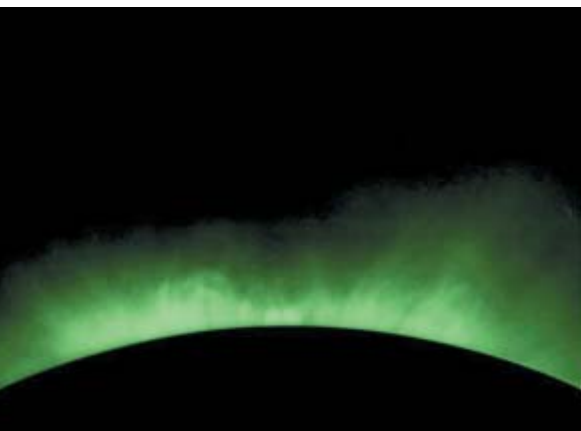




NSO/Sacramento Peak-USA/AFM/GARL/NOES et NSF/NOAO/SDSP

5. LA LUMIÈRE VERTE CARACTÉRISTIQUE émise par la couronne solaire trahit sa température très élevée : elle est produite par le fer ionisé lorsqu'il perd la moitié de son cortège électronique, ce qui nécessite des températures de l'ordre du million de kelvins.

composantes de longueurs d'onde et de polarisation différentes. Malheureusement, dans la couronne, les raies spectrales sont étalées sous l'effet de la température élevée, si bien que l'effet Zeeman est masqué. Pour évaluer le champ magnétique dans la couronne, les astronomes doivent recourir à des extrapolations mathématiques des données dont ils dis-

posent pour la photosphère. Ils prévoient un champ magnétique coronal d'une intensité proche de dix gauss, soit 20 fois le champ magnétique de la Terre aux pôles. Dans les régions actives, ce champ magnétique pourrait atteindre 100 gauss.

Les travaux des champs

Ces intensités magnétiques sont faibles si on les compare à celles que l'on produit dans les laboratoires, mais elles ont une influence décisive sur la couronne solaire. En effet, la température de la couronne est si élevée que la quasi-totalité des atomes qu'elle contient est ionisée : c'est un plasma constitué presque exclusivement de particules chargées (protons, électrons et noyaux atomiques, essentiellement d'hélium).

Le champ magnétique solaire agit sur les particules chargées et, par conséquent, influe sur l'écoulement du plasma. Les particules se déplacent sur des trajectoires hélicoïdales enroulées autour des lignes de champ. De ce fait, elles progressent difficilement dans les directions perpendiculaires aux lignes de champ : tout se passe comme si le champ magnétique exerçait une

pression sur le plasma de la couronne. Dans la couronne, cette pression magnétique (proportionnelle au carré de l'intensité du champ) excède la pression due à l'agitation thermique des particules d'un facteur 100 au moins. Ces limites imposées au mouvement du fluide coronal expliquent les frontières très nettes et les motifs caractéristiques tels que les plumes ou les boucles : comme la limaille de fer autour d'un aimant, le plasma de la couronne cartographie la structure invisible du champ magnétique.

Inversement, le champ magnétique subit l'influence du plasma, qui est un bon conducteur de l'électricité. Les lignes de champ magnétique ne peuvent pénétrer dans le volume d'un conducteur électrique parfait : les charges électriques du conducteur se déplacent instantanément sous l'effet de l'induction électromagnétique et produisent elles-mêmes un champ qui s'oppose au champ intrus. Ainsi, un plasma conducteur et un champ magnétique ne peuvent se déplacer l'un par rapport à l'autre. Pour cette raison, les lignes de champ magnétique sont partiellement piégées dans les plasmas (ce qui explique qu'elles



TRACE/NASA

6. LES BOUCLES CORONALES, peuvent s'élever jusqu'à 120 000 kilomètres au-dessus de la surface du Soleil. Elles ont été photographiées par le satellite TRACE en lumière ultraviolette. Il s'agit de boucles, formées par les lignes de champ magnétique qui percent la surface de l'étoile et piègent le plasma solaire. Quand une érup-

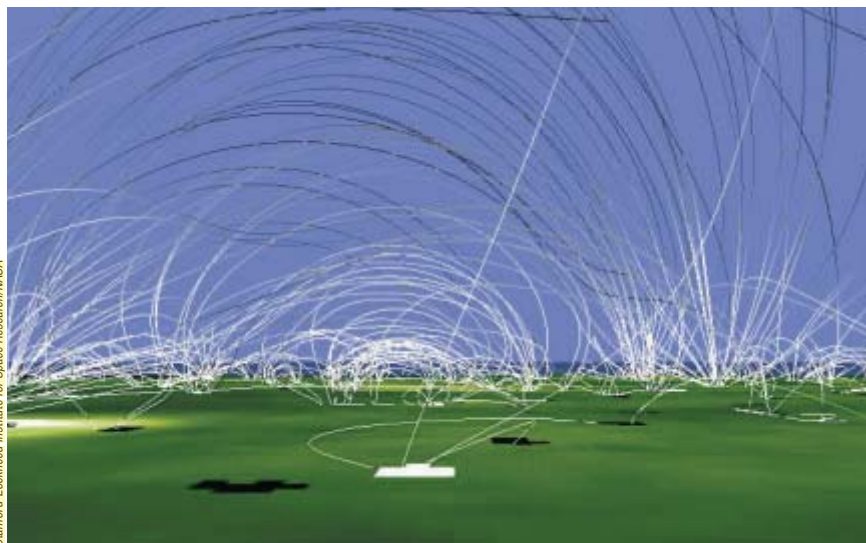
tion se produit au voisinage de boucles coronales, elle peut les faire vibrer. Ces oscillations sont très rapidement amorties, ce qui signifie que l'énergie de vibration est dissipée dans la couronne sous forme de chaleur. Peut-être est-ce là la source de la température anormalement élevée de la couronne.

sont entraînées par la rotation différentielle du Soleil).

Toutefois, si le champ magnétique était totalement «gelé» dans le plasma, ses lignes de champ ne pourraient pas s'y déplacer, ni transférer de l'énergie à la couronne. C'est une des raisons pour lesquelles les astronomes ne comprenaient pas comment l'énergie magnétique pouvait être transformée en chaleur dans l'atmosphère solaire. En effet, pour réaliser cette conversion, le champ doit diffuser à travers le plasma. Les lignes de champ peuvent alors se déplacer afin que leurs vibrations agitent la matière coronale.

Pour que les lignes du champ magnétique solaire puissent diffuser dans le plasma de la couronne, il faut que ce dernier ne soit pas un conducteur parfait, il doit opposer une certaine résistance au passage du courant électrique, que l'on nomme «résistivité». De façon générale, la vitesse de diffusion d'un champ à travers un plasma est inversement proportionnelle à la résistivité électrique. La physique classique des plasmas suppose que ce sont les collisions entre les particules chargées qui «freinent» leur progression – un phénomène nommé «collisions coulombiennes» –, conférant au milieu sa résistivité électrique. Or, le plasma coronal est si ténu que les collisions coulombiennes n'engendrent qu'une résistivité très faible, si faible qu'il faudrait au champ magnétique environ dix millions d'années pour diffuser sur des distances de l'ordre de celles que l'on trouve dans les structures de la couronne (10 000 kilomètres pour une boucle moyenne de région active).

Pourtant, les événements qui se produisent dans la couronne se déroulent sur des échelles temporelles bien plus courtes (quelques minutes pour certaines éruptions). Ce paradoxe ne peut être expliqué que de deux façons : soit les lignes de champs diffusent sur de très petites distances, soit la résistivité du plasma est beaucoup plus élevée qu'on ne le pensait. On a mis en évidence des distances de diffusion de quelques mètres seulement dans certaines structures accompagnées d'un fort gradient magnétique. De surcroît, les astronomes commencent à admettre que la résistivité du plasma coronal est notablement supérieure à celle qu'ils préoyaient. Depuis quelques années, les physiciens observent des instabilités capables d'en-



7. LES LIGNES DE CHAMP MAGNÉTIQUE proches de la surface du Soleil forment une «moquette» dont les «poils» oscilleraient très rapidement. Cette simulation est une extrapolation mathématique du champ dans l'atmosphère solaire, obtenue d'après les observations réalisées par le satellite SOHO.

gendrer des turbulences dans les plasmas créés en laboratoire. Ces turbulences produisent des fluctuations locales de la charge moyenne du plasma qui sont des sources de résistivité bien plus puissantes que les collisions aléatoires entre particules.

Les bonnes ondes

Pendant des années, pour expliquer l'échauffement de la couronne, les astronomes ont admis que des ondes de différents types devaient, en se dissipant dans le plasma coronal, lui transférer de l'énergie. Jusqu'à la fin des années 1970, ils pensèrent, que les ondes sonores (c'est-à-dire des fluctuations de pression se propageant dans le plasma) seraient suffisantes. L'énergie d'une onde sonore se dissipe parce qu'elle est transformée en agitation aléatoire des particules du gaz, c'est-à-dire en chaleur. Cependant, les physiciens ont établi que les ondes sonores émergeant de la photosphère s'atténuent rapidement dans la chromosphère et n'atteignent jamais la couronne.

Les soupçons se sont alors tournés vers les ondes magnétiques. Il s'agit d'ondes dites d'Alfvén, des oscillations non pas de la pression du plasma mais des lignes de champ elles-mêmes. Comme on l'a rappelé, un déplacement du champ magnétique crée un courant électrique, c'est-à-dire un déplacement des particules chargées qui constituent le plasma. Ces particules rencontrent – par exemple, à la suite de chocs – une certaine résistance à leur mouvement

d'ensemble, et leur énergie est dissipée sous forme de chaleur (un phénomène analogue à l'échauffement d'une résistance par le passage d'un courant).

Aujourd'hui, on pense que les ondes présentes dans la couronne solaire sont des ondes magnétohydrodynamiques présentant à la fois les caractéristiques des ondes sonores et celles des ondes d'Alfvén. Lors de la progression d'une onde magnétohydrodynamique, des variations de la structure du champ et de la pression du fluide progressent de conserve en s'entretenant mutuellement, emportant de l'énergie sous forme mécanique et électromagnétique. Les physiciens des plasmas en déduisent l'existence de deux types d'ondes magnétohydrodynamiques : le mode rapide, qui progresse plus vite qu'une onde d'Alfvén (environ 2 000 kilomètres par seconde dans la couronne) et le mode lent, qui progresse moins vite. La traversée d'une boucle dans une région active typique requiert environ cinq secondes pour une onde d'Alfvén, moins pour une onde magnétohydrodynamique rapide, mais au minimum une demi-minute pour une onde lente.

Les ondes magnétohydrodynamiques sont déclenchées par des perturbations de la convection au sein de la photosphère (des «séismes d'étoile») et transportées par les champs magnétiques jusque dans la couronne, où leur énergie serait alors dissipée. Toutefois, pour cela, il faut que les propriétés électriques du milieu coronal permettent le déplacement des lignes de champ et la dissipation de l'énergie magnétique