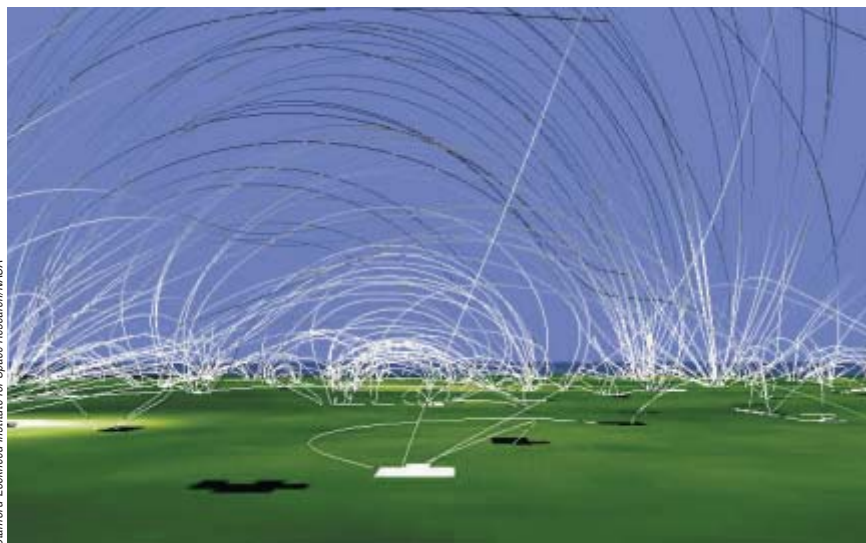


sont entraînées par la rotation différentielle du Soleil).

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.

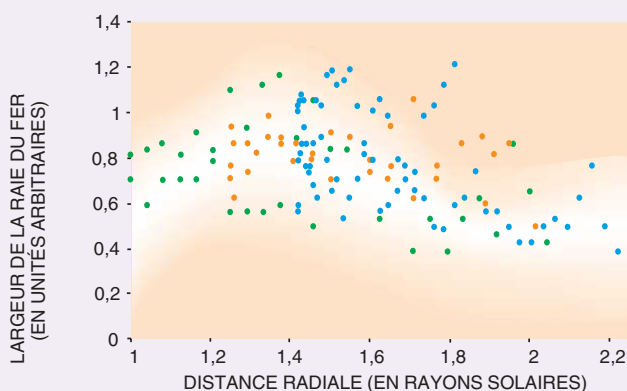
Les ondes magnétohydrodynamiques sont déclenchées par des perturbations de la convection au sein de la photosphère (des «séismes d'étoile») et transportées par les champs magnétiques jusque dans la couronne, où leur énergie serait alors dissipée. Toutefois, pour cela, il faut que les propriétés électriques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

Le diagnostic spectroscopique

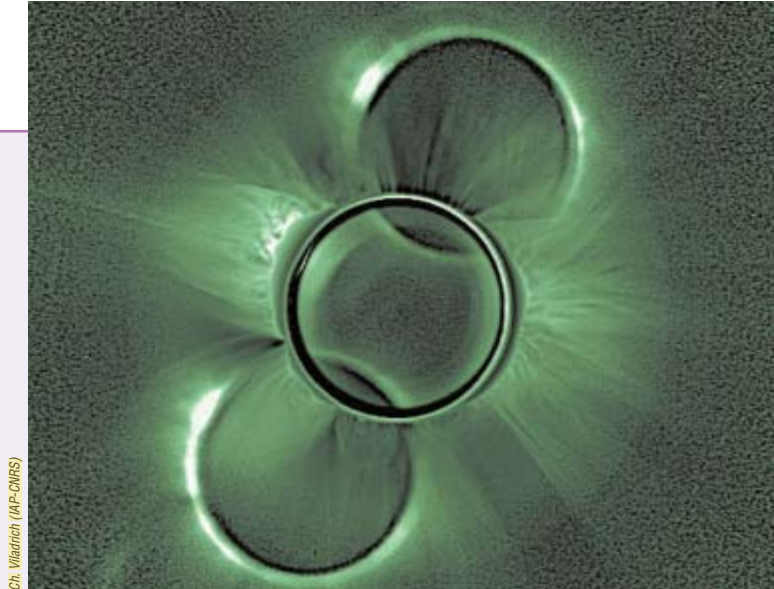
La recherche des ondes responsables de l'échauffement de la couronne est délicate. Néanmoins, au-delà de l'imagerie rapide monochromatique utilisée notamment par K. Phillips, la méthode dite du «diagnostic spectroscopique» permet de tester les prévisions théoriques. Elle a été proposée depuis longtemps et testée lors des éclipses, au gré des performances des détecteurs. Des progrès notables ont été enregistrés ces dernières années.

Cette méthode consiste à mesurer soigneusement le profil d'une raie spectrale d'émission de la couronne, en général la raie verte très intense du fer ionisé 13 fois. La largeur d'une raie spectrale contient des informations sur les conditions «d'agitation» des ions de la couronne. À cause de l'effet Doppler, les ondes émises par une source en mouvement sont décalées d'une quantité proportionnelle à sa vitesse le long de la ligne de visée (vers les courtes longueurs d'ondes si la source se rapproche de l'observateur, vers les grandes longueurs d'ondes si elle s'en éloigne). Lorsque les ions responsables d'une raie d'émission sont agités, cette raie est élargie sur un intervalle de longueurs d'ondes d'autant plus grand que la distribution des vitesses des ions est large. De ce fait, la largeur de la raie verte du fer ionisé 13 fois nous renseigne à la fois sur l'agitation thermique des ions, c'est-à-dire sur la température coronale, et sur les mouvements d'ensemble qui agitent le plasma.

Les mouvements du plasma peuvent être provoqués par des ondes sonores ou des ondes magnétohydrodynamiques (pour lesquelles des oscillations du champ et des fluctuations de pression du plasma s'entretiennent mutuellement). L'amplitude de ces mouvements est d'autant plus grande que la densité du milieu est faible (le mouvement est alors faiblement «entravé»). Comme la densité de l'atmosphère solaire décroît régulièrement avec l'altitude, la théorie prévoit que la largeur à mi-hauteur de la raie du fer croît avec la distance au Soleil. Par ailleurs, on suppose généralement que des collisions se produisant dans le plasma ont le double



2. LA LARGEUR DE LA RAIE VERTE DU FER, mesurée à mi-hauteur, augmente avec la distance radiale – comme le prévoit la théorie – jusqu'à environ 1,5 rayon solaire. La décroissance observée ensuite n'était pas prévue et semble indiquer que les ions sont faiblement agités dans la direction de la ligne de visée. Chaque série de mesures (chaque ensemble de points de même couleur) indique des largeurs de raie différentes pour une même distance radiale, car les résultats dépendent des détails de la structure coronale ; les variations de la largeur de raie du fer en fonction de la distance radiale apparaissent seulement lorsque le nombre de mesures est élevé.



1. LA COURONNE VERTE a été photographiée lors de l'éclipse totale de juin 2001. Elle montre que les atomes de fer ionisés 13 fois émettent jusqu'à des distances de 3,5 rayons solaires. Les deux répliques, de part et d'autre du Soleil, sont des images parasites.

effet d'arracher 13 électrons aux atomes de fer et de porter les ions ainsi formés au niveau d'énergie correspondant à la raie verte. Dans ce cas, l'intensité de la raie est approximativement proportionnelle au carré de la densité du plasma, et elle décroît très rapidement avec cette distance.

L'expérience confirme ces prévisions pour la couronne interne (jusqu'à 1,5 rayon solaire). Toutefois, à plus grande distance, nos observations, confortées par une nouvelle série de spectres réalisés lors de l'éclipse de juin 2001 observée en Angola, révèlent des effets inattendus. Tout d'abord, la raie verte reste intense à grande distance (voir la figure 1), révélant les structures de la «couronne verte» jusqu'à une altitude record de 3,5 rayons solaires. Ceci signifie que la raie n'est plus produite par collision, mais par un nouveau mécanisme : les atomes de fer ionisés 13 fois seraient excités par le rayonnement solaire et émettraient de la lumière selon un processus de désexcitation, semblable à la fluorescence. De plus, il faut expliquer la présence de ces atomes ionisés 13 fois, et par conséquent d'une température de l'ordre de deux millions de kelvins.

Or, l'analyse montre que la largeur de la raie décroît de façon spectaculaire (voir la figure 2). Ce résultat indique que les mouvements du plasma ne correspondent pas à la présence d'ondes, et il faut supposer qu'un nouveau mécanisme permet au champ magnétique de réchauffer la couronne à cette distance. Ce résultat est d'autant plus frappant, qu'à des distances de l'ordre de deux rayons solaires, la largeur de la raie devient très faible, plus faible même qu'elle ne devrait l'être à une température de l'ordre de deux millions de kelvins (température nécessaire pour ioniser le fer 13 fois).

Nous pensons que, dans cette région, les ions sont animés de vitesses faibles dans la direction de la ligne de visée, mais de grandes vitesses dans le sens radial (un tel mouvement anisotrope s'apparente à celui du vent solaire, le flot de particules éjecté de la couronne et qui emplit le Système solaire). Nous faisons l'hypothèse que des tubes de champ magnétique canalisent des flots de plasma et les accélèrent radialement ; ce mécanisme fournirait aux atomes de fer l'énergie nécessaire à leur très forte ionisation.

Serge KOUTCHMY,
Institut d'Astrophysique de Paris-CNRS.