

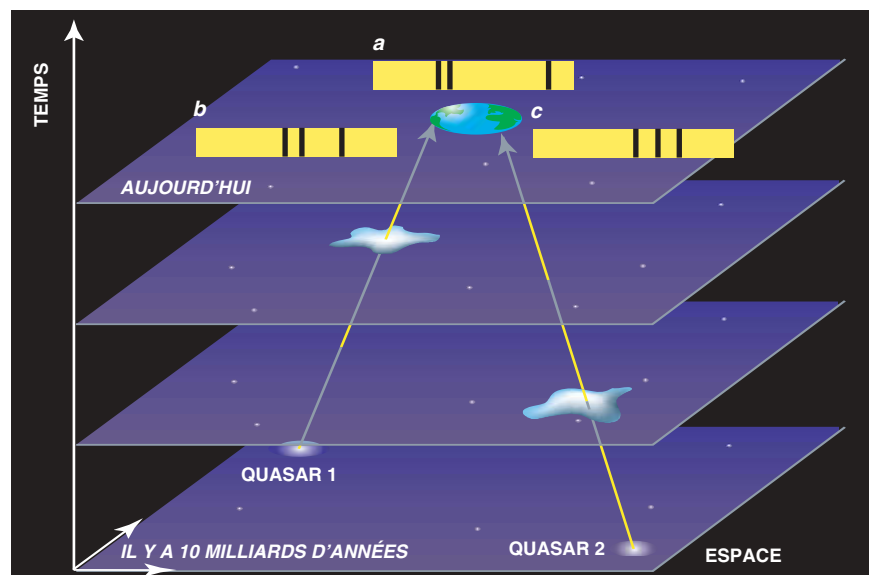
cordes vibrantes dont les modes d'oscillation possibles déterminent chacun des types de particules existant dans l'Univers. À grande échelle, la théorie des cordes redonne les lois de la relativité générale à un détail près : en plus de la gravitation, elle fait apparaître une nouvelle particule, le dilaton, capable de faire fluctuer certaines constantes fondamentales dans le temps et dans l'espace (les constantes de couplage des quatre forces fondamentales de la nature). Comme de nombreuses expériences assurent que ces constantes sont fixes depuis plus de deux milliards d'années, les théoriciens pensent que le dilaton s'est stabilisé rapidement, dans les premières minutes de l'histoire de l'Univers, «gelant» les constantes fondamentales autour de certaines valeurs, celles qu'on leur connaît aujourd'hui.

Les trajectoires des électrons dans un atome sont légèrement perturbées par la présence, dans le vide, de fluctuations quantiques du champ électromagnétique. Ces fluctuations modifient faiblement les valeurs des niveaux d'énergie dans cet atome. Comme l'intensité de ces modifications dépend de la valeur de la constante de couplage électromagnétique, une variation de cette constante doit se traduire par une modification des positions relatives des raies spectrales d'un même élément. C'est ce que J. Webb et ses collègues cherchaient à déterminer en étudiant le spectre de certains éléments dans les nuages intergalactiques lointains. Les nuages choisis se trouvent à des distances comprises

entre 5 et 13 milliards d'années-lumière et nous apparaissent donc tels qu'ils étaient il y a 5 à 13 milliards d'années. Ainsi, cette méthode devrait permettre de sonder la valeur de la constante de couplage électromagnétique sur de très grandes durées, de l'ordre de 80 pour cent de l'âge de l'Univers.

D'après les résultats obtenus, la constante de couplage électromagnétique aurait varié d'une partie pour 130 000 entre il y a 15 et 8 milliards d'années, date après laquelle elle serait restée stable autour de sa valeur actuelle. Ce résultat ne remet pas en cause les scénarios bien établis décrivant les premières minutes de l'Univers et sont assez anciens pour être compatibles avec ce que l'on sait de la stabilité actuelle des constantes fondamentales. Toutefois, ils s'accordent mal avec les prédictions de la seule hypothèse en lice pour les interpréter, la théorie des cordes selon laquelle les constantes se sont stabilisées beaucoup plus tôt. Par ailleurs, les variations observées sont proches des limites de précision des instruments astronomiques et devront être confirmées.

Ces résultats illustrent la façon dont les astronomes et les physiciens espèrent tester la théorie des cordes à l'aide de mesures réalisées à l'échelle du cosmos tout entier. De telles méthodes permettraient d'explorer des comportements de la matière qui ne seraient directement accessibles qu'à l'aide de machines capables de communiquer à une particule une énergie de l'ordre de 10^{29} électrons-volts (un accélérateur de particules de la taille du Système solaire n'y suffirait pas!).



Parce que la lumière voyage à une vitesse finie, nous voyons les sources lumineuses lointaines, les quasars, par exemple, telles qu'elles étaient il y a plus de dix milliards d'années, et non telles qu'elles sont aujourd'hui. La lumière émise dans le passé porte la trace des nuages de gaz traversés à différentes époques. Ainsi, on peut l'utiliser comme un «sondeur» de l'espace-temps et comparer le spectre actuel d'un élément chimique (a) à celui qu'il a laissé sur la lumière à des époques antérieures (b et c). On déduit de la comparaison de ces spectres l'éventuelle variation des constantes fondamentales de la physique.

Proofs from THE BOOK enfin en français!

M. Aigner, Freie Universität Berlin,
Germany ; G.M. Ziegler, Technische
Universität, Germany

Raisonnements divins

Quelques démonstrations mathématiques
particulièrement élégantes.



Traduit de l'anglais par
Jean-Marie Morvan

à paraître en octobre 2001.
env. 220 p. Relié 290 FF,
ISBN 2-287-59723-9

L'objet de ce livre sont les preuves "parfaites" : idées brillantes, rapprochements intelligents et observations remarquables qui apportent un nouvel éclairage et des perspectives surprenantes sur des problèmes fondamentaux en théorie des nombres, géométrie, analyse combinatoire. Trente très beaux exemples sont présentés dans ce livre. Ils sont candidats pour le Livre dans lequel Dieu aurait répertorié les démonstrations parfaites - d'après Paul Erdős, qui a lui-même suggéré plusieurs thèmes de cet ouvrage.

"... Le résultat est un ouvrage à l'antipode du scolaire dans lequel il fait bon musarder de théorème en proposition ou s'émerveiller de l'esprit de finesse mis en avant lors d'un raisonnement délicat. Et ce, en partant toujours de notions élémentaires, concrètes, compréhensibles même par ceux qui n'ont pas fait d'études mathématiques.

Une agréable mise en pages vient panacher le tout : le texte est recentré et deux larges marges peuvent accueillir illustrations, dessins, calculs explicatifs et même les propres notes du lecteur."

Libération, 23 février 1999
à propos de l'édition anglaise

Les prix indiqués et autres détails sont susceptibles d'être modifiés sans avis préalable.

Springer Verlag
1 rue Paul-Cézanne, 75008 Paris
Tél. 0800 919 343 numéro vert
Fax 01 53 93 37 29
<http://www.springer.de>

La brûlante couronne

BHOLA DWIVEDI • KENNETH PHILLIPS

L'atmosphère du Soleil est près de 200 fois plus chaude que sa surface. Soixante ans d'observations, à l'aide d'instruments basés sur la Terre ou dans l'espace, ont été nécessaires aux astronomes pour commencer à expliquer ce paradoxe.

Le 11 août 1999, en Europe et en Asie, des dizaines de millions de personnes ont assisté à un des plus beaux spectacles naturels : une éclipse totale de Soleil. Nous y étions également. L'un d'entre nous (Kenneth Phillips) observait la couronne solaire depuis la Bulgarie, profitant de l'occultation de l'éblouissant disque solaire par la Lune. Quelques minutes plus tard, l'autre (Bhola Dwivedi) assistait à la disparition du Soleil en Inde, mais, la féerie fut gâchée par un voile nuageux. En juin dernier, une nouvelle éclipse était observable au Sud de l'Afrique. Cette fois encore, les astronomes ont tenté de profiter de l'occasion : en effet, les éclipses constituent les rares moments où nous pouvons, à la surface de la Terre, étudier en détail la couronne solaire afin d'élucider le mystère de sa température si élevée.

Le Soleil a beau ressembler à une boule uniforme de gaz, il est en réalité constitué de couches bien définies, aussi distinctes les unes des autres que la croûte solide d'une planète l'est de son atmosphère. Le rayonnement solaire, dont dépend la vie sur Terre, est produit au cœur de l'étoile par des réactions nucléaires. L'énergie se fraie un chemin vers l'extérieur jusqu'à ce qu'elle atteigne la surface visible du Soleil, la photosphère, et qu'elle s'échappe dans l'espace. Au-dessus de cette surface se trouve une atmosphère ténue dont la partie la plus basse, la chromosphère, apparaît, lors des éclipses de Soleil, comme un liseré rouge vif entourant l'astre du jour. Au-delà de la chromosphère se trouve la couronne, d'un blanc nacré, qui s'étend sur des millions de kilomètres. C'est de la couronne qu'est issu le vent solaire, ce flot de particules chargées qui souffle à travers tout le Système solaire.

La température du Soleil décroît fortement de son cœur (15 millions de kelvins) à la photosphère (seulement 6 000 kelvins). Cependant, au-dessus de la photosphère, le gradient de température s'inverse de façon inattendue. La température de la chromosphère augmente régulièrement pour atteindre 10 000 kelvins, et plus d'un million de kelvins lorsqu'on pénètre dans la couronne. Ce comportement étonnant semble contredire les lois de la thermodynamique qui exigent que la chaleur s'écoule toujours d'une source chaude vers une

source froide, et interdisent, par exemple, qu'une plaque électrique tiède puisse porter une casserole d'eau à ébullition. Comment l'atmosphère solaire, posée sur la photosphère à 6 000 kelvins, peut-elle atteindre des températures 200 fois supérieures ? Ceci n'est possible que si l'énergie nécessaire au chauffage de la couronne, plutôt que de venir de la photosphère, est directement transférée dans l'atmosphère solaire des couches plus profondes de l'étoile.

Le mystère de la température de la couronne solaire dure depuis la fin du XIX^e siècle. À cette époque, les observateurs d'éclipses détectèrent, en provenance de la couronne, des raies spectrales d'émission qui ne semblaient correspondre à aucun élément connu. Dans les années 1940, les physiciens montrèrent que deux de ces raies pouvaient être produites par des atomes de fer ayant perdu la moitié de leur cortège de 26 électrons. Or, pour que les atomes de fer soient à ce point ionisés, des températures extrêmement élevées sont nécessaires. Plus tard, des instruments embarqués sur des fusées et sur des satellites ont révélé que le Soleil émet en abondance des rayons X et ultraviolets, ce qui, là encore, implique des températures de l'ordre du million de kelvins.

Cet étrange phénomène n'est pas l'apanage du Soleil : la plupart des étoiles de type solaire ont apparemment des atmosphères qui émettent des rayons X et sont, par conséquent, également très chaudes. Les instruments actuels n'autorisent pas l'observation directe de la surface de ces étoiles, mais la spectroscopie permet de détecter la présence de taches stellaires, et les observations des rayonnements X et ultraviolets révèlent l'existence d'une éventuelle couronne et d'éruptions, souvent plus puissantes que leurs homologues solaires. Les spectres à haute résolution de l'EUE (explorateur de l'extrême ultraviolet) et les satellites sensibles aux rayons X, Chandra et XMM-Newton, donnent accès à la température et à la densité des atmosphères stellaires. L'étoile Capella, par exemple, est en fait un système stellaire constitué de deux étoiles géantes qui présentent des températures photosphériques comparables à celle du Soleil, mais des températures coronales six fois supérieures. L'intensité des raies spectrales émises par ces couronnes

du Soleil



1. LA COURONNE SOLAIRE, ici photographiée en lumière visible le 11 août 1999, en Iran, n'est observable du sol dans sa totalité que lors des éclipses totales, lorsque la Lune recouvre le disque solaire. Les volutes gris-bleu de la couronne sont produites par un gaz très ténu porté à une température très élevée : plus de un million de degrés. La base de l'atmosphère solaire, plus froide est nommée «chromosphère» en raison de sa couleur fuschia caractéristique. Lors d'une éclipse, les protubérances de la chromosphère (*ci-contre en bas*) ainsi que des spicules apparaissent près du bord du disque lunaire (*image IAP-CNRS*).

Institut d'astrophysique de Paris - CNRS

indique une densité de plasma environ 100 fois supérieure à celle de la couronne solaire. Cette haute densité indique que les couronnes de Capella sont beaucoup plus petites que celle du Soleil ; chacune doit avoir une épaisseur ne dépassant pas un dixième du rayon de l'étoile. Par ailleurs, il semble que la répartition du champ magnétique varie d'une étoile à l'autre. Dans certains cas, quand des planètes circulent très près d'une étoile, elles peuvent en modifier le champ magnétique.

Après plusieurs décennies de recherches, une explication semble enfin plausible : le champ magnétique du Soleil serait capable de transférer de l'énergie directement de l'intérieur de l'étoile jusqu'à la couronne, lui conférant sa température élevée. Un champ magnétique ne transporte pas l'énergie sous forme de chaleur, ce qui lui permet de court-circuiter les restrictions thermodynamiques d'usage (qui exigent que la chaleur ne s'écoule que des sources

chaudes vers les sources froides). De plus, les observations montrent que la couronne est plus chaude là où le champ magnétique est plus intense. Les astrophysiciens essaient maintenant de comprendre comment cette énergie magnétique est convertie en chaleur.

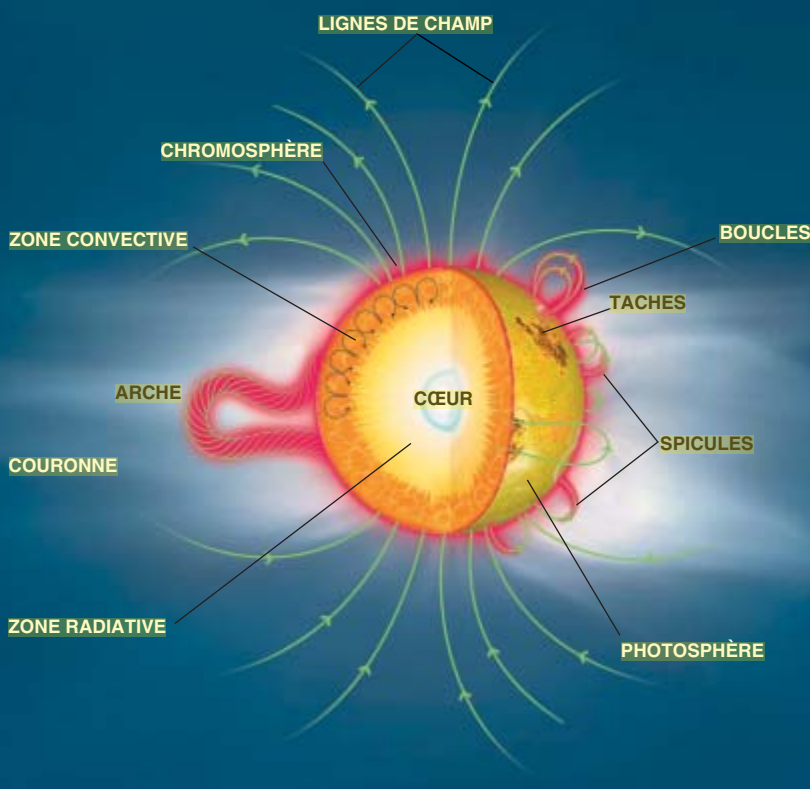
Les astronomes observent le Soleil à l'aide de sondes spatiales captant des longueurs d'onde (notamment des rayonnements X ou ultraviolets) que l'atmosphère terrestre nous empêche d'observer de la Terre. Par ailleurs, en utilisant des télescopes au sol pendant les éclipses, ils collectent de grandes quantités de données sans être limités par le débit restreint des communications entre l'espace et la Terre. Ces deux méthodes complémentaires nous ont apporté des indices qui ont partiellement éclairci le mystère de la température coronale.

En 1973 et en 1974, les télescopes à ultraviolets et à rayons X de la station spatiale américaine *Skylab* ont fourni

les premières images à haute résolution de la couronne. Sur ces images, on observe, dans les régions actives de la couronne qui surplombent les taches solaires de la photosphère, des complexes de fines boucles qui apparaissent et disparaissent en quelques jours. Plus loin, des arches diffuses, brillantes en rayons X, s'étendent sur des millions de kilomètres. À l'écart de ces régions actives, dans les zones calmes du Soleil, la surface de l'étoile, photographiée en ultraviolet, présente une structure en nid d'abeille. Enfin, près des pôles magnétiques solaires, la couronne émet peu de rayons X ; c'est pourquoi on nomme ces zones des «trous coronaux». Depuis *Skylab*, chaque nouvelle sonde spatiale a fourni des images du Soleil dont la résolution n'a cessé d'être améliorée.

L'observation spatiale

Depuis 1991, le télescope à rayons X embarqué à bord du satellite japonais *Yohkoh* prend régulièrement des clichés de la couronne. L'intensité de l'activité magnétique du Soleil croît et décroît selon un cycle assez régulier de 11 années. Ainsi, ce satellite a surveillé l'évolution des caractéristiques de la couronne sur la totalité d'un cycle d'activité solaire. Par ailleurs, l'observatoire spatial SOHO (un observatoire héliosphérique et solaire), un satellite lancé conjointement par l'Europe et par les États-Unis en 1995, est en orbite entre le Soleil et la Terre, à 1,5 million de kilomètres de cette dernière, dans une position qui lui permet de scruter l'astre du jour sans interruption. Un de ses instruments, LASCO (un coronographe spectroscopique à grand angle) observe la couronne en lumière visible en masquant le disque éblouissant du Soleil à l'aide d'un masque opaque. Il suit l'évolution des structures coronales à grande échelle se déplaçant avec la rotation du Soleil (dont la période est d'environ 27 jours). D'autres instruments de SOHO, telle la caméra EUV (ultraviolet extrême), permettent d'obtenir des images très supérieures à celles de *Skylab*. Enfin, le satellite TRACE (explorateur de la couronne et de la région de transition), du Laboratoire Stanford-Lockheed pour la recherche spatiale, a été placé en orbite polaire autour de la Terre en 1998. Grâce à une résolution sans précédent, son télescope ultraviolet a révélé une grande quantité de détails nouveaux. On sait



2. LE SOLEIL EST CONSTITUÉ DE COUCHES DISTINCTES : l'énergie est produite dans le cœur par des réactions thermonucléaires, puis elle diffuse pendant près de 200 000 ans à travers la zone radiative avant d'atteindre la zone convective où d'immenses rouleaux de matière l'évacuent rapidement dans l'espace. Le champ magnétique solaire est produit à la frontière entre les zones convective et radiative. Les lignes de champ sont déformées par la rotation différentielle du Soleil (les hautes latitudes tournent moins vite que les latitudes équatoriales) et s'emmêlent progressivement. Elles percent la surface aux emplacements correspondant aux taches solaires. Elles piègent le plasma de la couronne et de la chromosphère et forment des spicules, des boucles, voire de gigantesques arches. À grande échelle, dans la couronne, le plasma coronal, très fortement ionisé, rend visible la structure du champ magnétique solaire, comme de la limaille de fer saupoudrée autour d'un aimant.