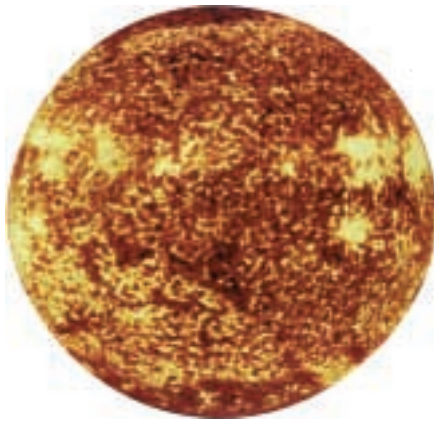




Pourquoi le Soleil brille-t-il?

ROLAND LEHOUCQ

Le Soleil brille parce qu'il est chaud, résultat d'un équilibre entre deux forces : la gravitation et la pression.

Pour les Grecs de l'Antiquité, Hélios le dieu Soleil parcourait le ciel dans son char brûlant, prodiguant lumière et énergie aux mortels. Au XIX^e siècle, les physiciens pensaient que le Soleil était une sphère de matière chaude qui se refroidissait. Ils en déduisaient que le Soleil n'avait pas plus que quelques dizaines de millions d'années, en contradiction flagrante avec les données géologiques de l'époque. Cette «crise de l'âge» n'a été résolue qu'au début du siècle, à l'aide des outils de la physique nucléaire.

En examinant le Soleil à l'aide de la thermodynamique et de la physique nucléaire, nous dresserons un portrait de plus en plus précis du Soleil et plus généralement des étoiles. Nous verrons que la masse des étoiles ne peut-être trop grande, ni trop petite et que les réactions de fusion les empêchent de s'effondrer sur elles-mêmes.

ENTRE L'ENVOI ET LA CHUTE

Le Soleil est une étoile, c'est-à-dire une importante masse de gaz chaud dont la cohésion est assurée par la gravitation : cette force tend à rapprocher toutes les particules. Sculptées par leur propre gravité, les étoiles sont sphériques, avec un léger renflement équatorial lorsqu'elles sont en rotation.

Pourquoi une étoile ne se contracte-t-elle pas en un point? Parce que la pression du gaz s'oppose à la gravité. À cette pression «classique» s'ajoute la pression de rayonnement due aux rebonds des photons

sur les particules matérielles (c'est cette pression qui repousse les grains de poussières des comètes pour former une queue courbe). Si toute pression venait à disparaître, le Soleil s'effondrerait sur lui-même en quelques minutes! Un équilibre s'installe à condition que la pression augmente en s'enfonçant vers le centre du Soleil, car les couches les plus profondes doivent supporter le poids de toute la matière qui les coiffe (voir la figure 1). De la même façon, la gravité terrestre fait que la pression de notre atmosphère augmente à mesure que l'on s'approche du sol.

On détermine aussi que la densité et la température croissent avec la profondeur : au centre du Soleil, la température est de 15 millions de degrés et la densité de 150 grammes par centimètre cube (la densité du plomb est de 11 grammes par centimètre cube). Plus une étoile est massive, plus sa masse est supportée par une pression intérieure élevée et plus son centre est chaud.

Toutefois, la pression du rayonnement, proportionnelle à la puissance quatrième de la température, croît bien plus vite que la pression du gaz, proportionnelle à la température. Pour des étoiles très massives, la température centrale serait trop élevée et la pression du rayonnement si grande que l'étoile serait soufflée par sa propre lumière : la limite supérieure de la masse d'une étoile est d'environ 100 fois la masse du Soleil.

LE RAYONNEMENT MINE L'ÉQUILIBRE

Le fort contraste de température entre le centre du Soleil et sa surface, où il ne règne «que» 5 700 degrés, détermine son évolution. Ici comme ailleurs, la chaleur s'écoule des régions chaudes vers les régions froides, du cœur vers la surface. Arrivée en surface, cette énergie s'échappe sous forme de lumière. Le rayonnement résulte donc de l'action de la gravité qui comprime et chauffe en permanence les régions centrales. Ainsi, le Soleil brille parce qu'il est suffisamment massif pour que la gravité impose sa loi.

Cependant, cette égalisation des température est tenue en échec par le jeu de la gravité. L'énergie d'une étoile diminue sous l'effet de l'émission de rayonnement et il faut que le moteur gravité agisse pour maintenir sa température : l'étoile se contracte, ce qui augmente la pression et la température des régions centrales.

L'étoile se réchauffe en perdant de l'énergie! Sa capacité calorifique, c'est-à-dire la quantité d'énergie à lui fournir pour augmenter sa température absolue d'un degré, est négative.

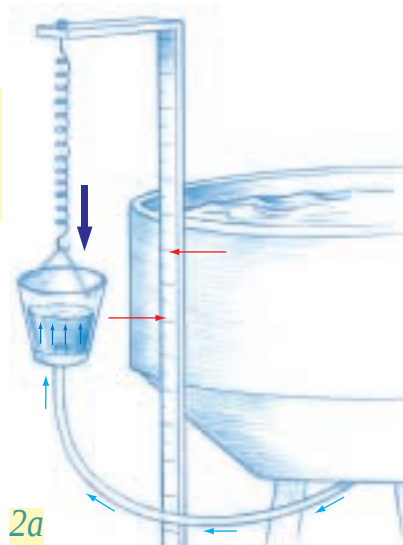
UNE ANALOGIE STELLAIRE : LE REMPLISSAGE DU SEAU

Une analogie mécanique nous aidera à comprendre ce comportement particulier. Nommons capacité volumique d'un seau le volume d'eau à y introduire pour augmenter son niveau d'un centimètre. Pour un seau normal, la capacité volumique est égale à la surface de sa section. Habituellement, les capacités calorifique et volumique sont positives : il faut apporter de l'énergie au gaz, ou remplir le seau, pour que la température, ou le niveau, augmente. Qu'en est-il d'un seau suspendu à un ressort?

Le remplissage du seau augmente sa masse ce qui allonge le ressort et le fait descendre. En choisissant un ressort



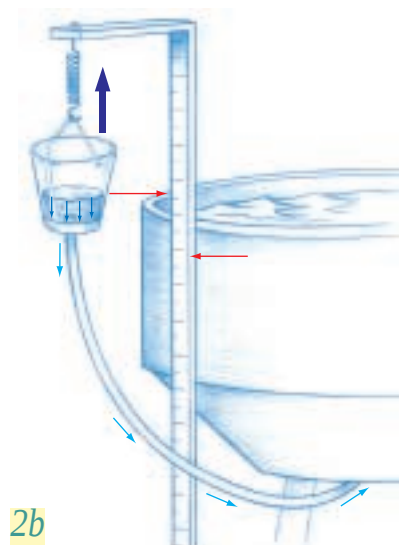
Dessins de Bruno Vacaro



2a

suffisamment mou, la descente du seau est supérieure à la montée de l'eau dans le seau. Si un grand réservoir alimente un seau suspendu dont le niveau absolu initial est plus bas que celui du réservoir, l'eau s'écoulera du réservoir vers le seau en raison du principe des vases communicants. L'alourdissement continu du seau abaissera continûment le niveau absolu de l'eau qu'il contient, bien qu'il se remplisse de plus en plus (voir la figure 2a). De même, lorsque son niveau absolu initial est supérieur à celui du réservoir, le seau se vide dans le réservoir et son niveau absolu ne cesse d'augmenter (voir la figure 2b).

Ainsi, notre seau suspendu à un ressort est de capacité volumique négative : le niveau absolu de l'eau diminue lorsque l'on ajoute de l'eau et il augmente lorsque l'eau s'en écoule. De surcroît, le système est instable, car cette tendance n'est jamais contrée.



2b

Comment stabiliser de tels systèmes ? En remplaçant le grand réservoir par un réservoir de plus petite section. Lorsque le niveau initial du seau est inférieur à celui du réservoir, l'eau s'écoule du réservoir vers le seau et le niveau absolu dans le seau diminue. Toutefois, en raison de sa faible section, le niveau dans le réservoir diminue plus vite que celui du seau et un équilibre est atteint (voir la figure 3a). De la même façon, un équilibre est atteint lorsque le niveau initial du seau est supérieur à celui du réservoir (voir la figure 3b). Le réservoir de faible section a une capacité volumique positive, inférieure en valeur absolue à la capacité volumique du seau.

NOUVEL APPORT D'ÉNERGIE

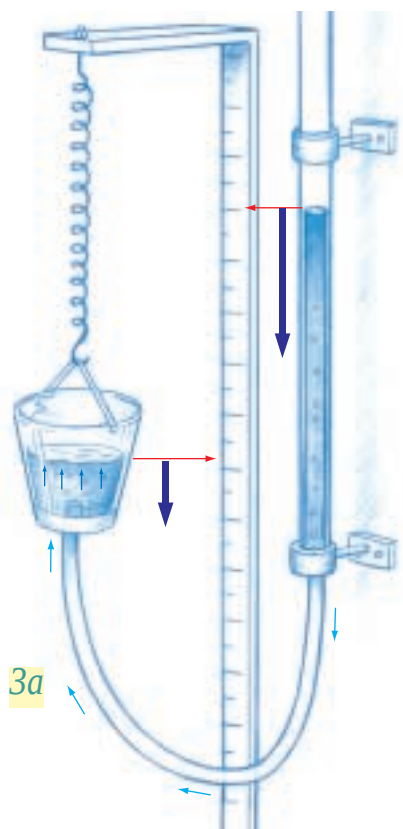
À mesure que le Soleil se contracte, la température des régions centrales augmente. À l'instar de notre seau suspendu à un ressort et relié à un grand réservoir,

la contraction et l'augmentation de température se poursuivraient indéfiniment s'il n'existait un mécanisme de stabilisation : au-delà d'une température et d'une densité critique, les réactions de fusion de l'hydrogène en hélium démarrent. Le cœur du Soleil, où les réactions nucléaires produisent de l'énergie, est le réservoir de faible section de notre analogie, le système de capacité calorifique positive.

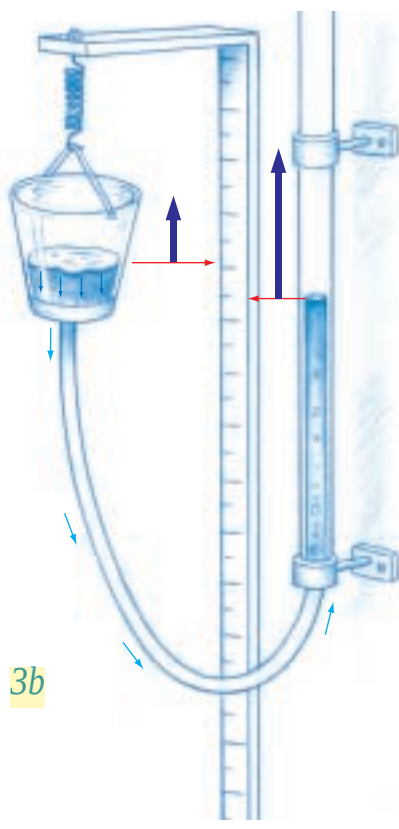
L'énergie engendrée par ces réactions stoppe la décroissance de l'énergie totale en compensant l'énergie rayonnée. La contraction s'arrête et la température est stabilisée. En cas d'emballement des réactions nucléaires, le Soleil se dilate, donc se refroidit, ce qui modère le taux de production d'énergie nucléaire. Inversement, si la production d'énergie nucléaire se tarit par manque de combustible, la contraction induite réchauffe le cœur et démarre un nouveau cycle de fusion brûlant les cendres du précédent. L'étoile est en équilibre stable. Lorsque le combustible nucléaire est épuisé, l'étoile redevient instable et son destin ultime dépend de sa masse ; des phénomènes quantiques entrent alors en jeu.

Une étoile est un astre autogravitant dont la masse est suffisante pour déclencher des réactions de fusion nucléaire : la limite inférieure de la masse d'une étoile est d'environ 0,2 fois la masse du Soleil. Pour des masses inférieures, la contraction n'est pas suffisante pour que les réactions nucléaires se déclenchent, car la pression quantique, due au fait que les électrons ne peuvent tous être dans le même état quantique, bloque la contraction et l'élévation de température.

À l'issue de ce voyage dans le fonctionnement du Soleil, on aboutit à la définition canonique d'une étoile : un réacteur nucléaire confiné et régulé par sa propre gravitation dont la masse est comprise entre 0,2 et 100 fois la masse du Soleil. Sans l'apport d'énergie des réactions nucléaires, notre Soleil ne brillerait qu'une vingtaine de millions d'années ; finalement, le plus surprenant n'est pas que le Soleil brille, mais bien qu'il ait brillé pendant plus de 4,5 milliards d'années.



3a



3b

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA.

J. AUDOUZE et **J.-P. CHIÈZE**, *Enquête sur l'Univers*, Nathan, 1990.

L. M. CELNIKIER, *Basics of Cosmic Structures*, Éditions Frontières, 1989.

M. NAUENBERG et **V. WEISSKOPF**, *Why Does the Sun Shine ?*, in *American Journal of Physics*, vol. 46, pp. 23, 1978.