

POURQUOI LE SOLEIL BRILLE ?

Patrice Poyet

Depuis que l'humanité contemple le ciel, le Soleil constitue l'un des plus grands mystères de la nature. Sans lui, il n'y aurait ni lumière, ni chaleur, ni vie sur Terre. Pourtant, jusqu'au début du XX^e siècle, personne ne savait répondre à la question : d'où provient l'énergie prodigieuse que le Soleil rayonne ?

Aujourd'hui, la réponse paraît presque évidente : le Soleil est une gigantesque centrale à fusion nucléaire. Chaque seconde, près de 600 millions de tonnes d'hydrogène sont transformées en hélium. Au cours de cette réaction, environ 4 millions de tonnes de matière disparaissent et sont converties en énergie conformément à la célèbre relation d'Einstein $E = mc^2$. Cette énergie migre lentement vers la surface avant d'être rayonnée dans l'espace sous forme de lumière et de chaleur.

Cette explication est pourtant l'aboutissement de plusieurs décennies de découvertes qui comptent parmi les plus belles réussites de la physique moderne.

UN MYSTÈRE DU XIX^e SIÈCLE

Au XIX^e siècle, les physiciens ne connaissaient aucune source d'énergie capable d'alimenter le Soleil pendant les immenses durées exigées par la géologie et la théorie de l'évolution de Darwin. Lord Kelvin proposa que le Soleil brillait grâce à sa contraction gravitationnelle, mais ce mécanisme ne lui accordait qu'une durée de vie de quelques dizaines de millions d'années.

Avec les connaissances de son époque, Kelvin ne s'était pas trompé : il lui manquait simplement une physique qui n'existait pas encore.

LA DÉCOUVERTE DE LA FUSION NUCLÉAIRE

Le premier tournant survint en 1905 avec la relativité restreinte d'Einstein, qui établit l'équivalence entre la masse et l'énergie. Quelques années plus tard, Arthur Eddington (1920) proposa que les étoiles tirent leur énergie de la transformation de l'hydrogène en hélium. Restait cependant une difficulté fondamentale : deux noyaux d'hydrogène, tous deux chargés positivement, se repoussent fortement. Comment pouvaient-ils fusionner au cœur des étoiles ?

La réponse fut apportée en 1928 par George Gamow. Grâce à la mécanique quantique, il montra qu'une particule peut franchir une barrière d'énergie qu'elle serait incapable de surmonter selon la physique classique : c'est l'effet tunnel. Ce mécanisme rend possibles les réactions de fusion aux températures régnant au

centre des étoiles. Dès l'année suivante, Atkinson et Houtermans (1929) appliquèrent cette idée aux réactions nucléaires stellaires. La théorie moderne fut finalement établie en 1939 par Hans Bethe.

Il démontra que le Soleil produit son énergie principalement par la chaîne proton-proton, tandis que les étoiles plus massives utilisent essentiellement le cycle carbone-azote-oxygène (CNO). Ces travaux constituent encore aujourd'hui le fondement de l'astrophysique stellaire.

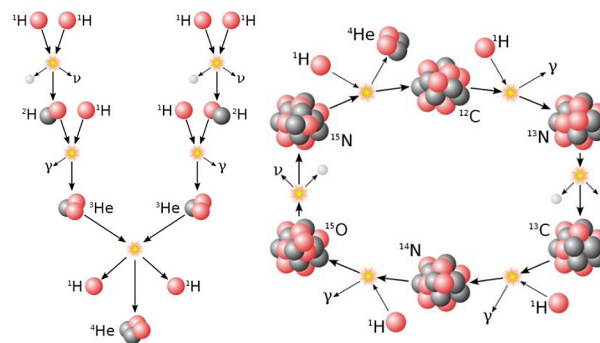


Fig. 1. Les deux principaux mécanismes de production d'énergie dans les étoiles : la chaîne proton-proton, dominante dans le Soleil, et le cycle CNO, prédominant dans les étoiles plus massives.

COMMENT LE SOLEIL PRODUIT SON ÉNERGIE

Au centre du Soleil, où la température atteint environ 15 millions de kelvins, la gravitation tend à comprimer l'étoile tandis que l'énergie produite par la fusion nucléaire exerce une pression qui s'oppose à cet effondrement. Cet équilibre hydrostatique maintient le Soleil remarquablement stable depuis près de 4,6 milliards d'années.

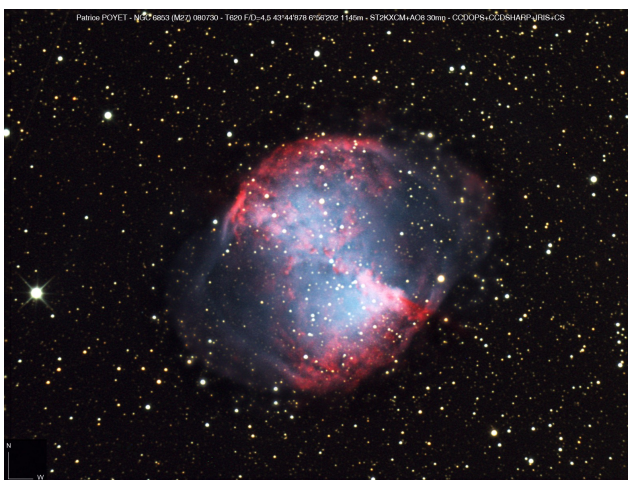
Chaque seconde, environ 600 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en 596 millions de tonnes d'hélium. Les quatre millions de tonnes « manquantes » sont transformées en énergie sous forme de photons et de neutrinos, produisant la luminosité solaire de $3,8 \times 10^{26}$ watts environ.

Pendant plusieurs décennies, les astronomes furent confrontés au « problème des neutrinos solaires » : les détecteurs en observaient moins que ne le prédisaient les modèles. La solution vint de la physique des particules : les neutrinos changent de saveur durant leur trajet entre le

Soleil et la Terre. Les observations modernes, l'héliosismologie et les mesures de neutrinos confirment aujourd'hui avec une remarquable précision notre compréhension de l'intérieur solaire (Christensen-Dalsgaard, 2021).

LE DESTIN DU SOLEIL

Le Soleil continuera à produire son énergie de cette manière pendant environ cinq milliards d'années encore. Lorsque son hydrogène central sera épuisé, il se dilatera pour devenir une géante rouge avant d'éjecter progressivement ses couches externes dans l'espace sous la forme d'une nébuleuse planétaire.



NGC 6553 (M27), Nébuleuse de l'Haltère, photographiée par l'auteur le 30/07/2008 - T620 F/D 4,5 (43°44'878 6°56'202) à 1 145 m.

Nébuleuse planétaire située à environ 1 360 années-lumière, son rayon de 1,01 année-lumière implique un âge cinématique de 9 800 ans. On estime que la naine blanche centrale, à l'origine de la nébuleuse, a un rayon de $0,055 \pm 0,02 R_{\odot}$ (0,13 seconde-lumière) et une masse estimée à $0,56 \pm 0,01 M_{\odot}$.

(avec $R_{\odot}$ l'unité de mesure astronomique « rayon solaire » et $M_{\odot}$ l'unité de mesure astronomique « masse solaire »).

Dans environ cinq milliards d'années, le Soleil formera lui aussi une nébuleuse planétaire avant de laisser subsister une naine blanche en son centre.

L'explication de l'énergie solaire constitue l'une des plus belles victoires de la physique moderne. En moins d'un demi-siècle, la relativité, la mécanique quantique et la physique nucléaire ont permis de résoudre une énigme qui avait résisté à plusieurs générations de scientifiques.

Ce qui apparaissait autrefois comme un mystère

remarquables de la puissance explicative de la science.

Chaque rayon de soleil qui atteint notre planète est ainsi le témoin d'une réaction nucléaire commencée au cœur de l'étoile il y a des dizaines de milliers d'années. Comprendre pourquoi le Soleil brille, c'est finalement comprendre l'origine de presque toute l'énergie qui fait vivre la Terre.

"Je n'ai fait celle-ci plus longue que parce que je n'ai pas eu le loisir de la faire plus courte" Blaise Pascal (1656).

Version intégrale de l'article

Une version longue de cet article est disponible à l'adresse¹ ; elle est une adaptation à partir du livre du même auteur "Stairway to Heaven - Cosmos and Life" §3.3-3-4 p. 133-141, ouvrage qui est librement téléchargeable ici².

Références

- Atkinson, R. d'Escourt, & Houtermans, F. G. (1929). Zur Frage der Aufbaumöglichkeit der Elemente in Sternen. Zeitschrift für Physik, 54, 656-665.
- Bethe, H. A. (1939). Energy Production in Stars. Physical Review, 55(1), 103-103.
- Burbidge, E. M., Burbidge, G. R., Fowler, W. A., & Hoyle, F. (1957). Synthesis of the Elements in Stars. Reviews of Modern Physics, 29(4), 547-650.
- Christensen-Dalsgaard, J. (2021). Solar structure and evolution. Living Reviews in Solar Physics, 18(1), 2.
- Eddington, A. S. (1920). The Internal Constitution of the Stars. The Scientific Monthly, 11(4), 297-303.
- Gamow, G. (1928). Zur Quantentheorie des Atomkernes. Zeitschrift für Physik, 51, 204-212.

Patrice Poyet, patricepoyet@yahoo.com est Docteur ès Sciences (1986) et s'est passionné pour la géologie, la planétologie, l'astronomie, l'informatique et la finance.

Pour plus de détails voir son profil et ses publications sur ResearchGate³ et ORCID⁴.

¹ https://www.researchgate.net/publication/408306013_POURQUOI_LE_SOLEIL_BRILLE

² https://www.researchgate.net/publication/403387930_Stairway_to_Heaven-Cosmos_and_Life

³ <https://www.researchgate.net/profile/Patrice-Poyet>

⁴ <https://orcid.org/0000-0001-8792-6874>