

**Zeitschrift:** Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

**Herausgeber:** Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

**Band:** 123 (1943)

**Artikel:** La vie des étoiles et des atomes

**Autor:** Weigle, Jean

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-90438>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 15.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# La vie des étoiles et des atomes

(Résumé)

Par

JEAN WEIGLE, prof., Genève

Que savons-nous des étoiles ? Le temps me manque pour vous dire par quelles méthodes ingénieuses les astronomes ont appris à connaître leurs dimensions, leurs masses, leurs températures, leurs distances. Cependant, pour vous faire saisir l'énigme devant laquelle nous serons placés, considérons comment on a pu déterminer la température superficielle du soleil, cette étoile que nous connaissons le mieux à cause de sa proximité relative de la terre. Les physiciens ont l'habitude de compter l'énergie au moyen d'unités, les ergs, qui sont très petites, ce qui fait que les nombres donnant l'énergie sont en général très grands. Ainsi l'énergie nécessaire pour chauffer une tasse de thé correspond environ à 200 milliards d'ergs, ou encore, en brûlant 1 g. de charbon, on libère environ 300 milliards d'ergs. Nous n'emploierons donc pas ces unités si peu commodes et nous parlerons de préférence de l'énergie contenue dans une certaine masse de charbon, en sous-entendant par là l'énergie libérée lors de la combustion de cette quantité de combustible. Eh bien, l'énergie que nous envoie le soleil correspond environ à 20 kg. de charbon par heure sur 100 mètres carrés de la terre. Connaissant la distance de la terre au soleil, il est alors facile de calculer que, dans l'espace, le soleil envoie par seconde une énergie de dix mille millions de millions de tonnes de charbon. Ou bien, sachant que le diamètre du soleil est d'un million et demi de kilomètres, on trouve que chaque centimètre carré de sa surface émet, par minute, une énergie correspondant à 12 g. de charbon environ. Or voici où je veux en venir : la surface d'un radiateur (100° C.) émet, par minute et par centimètre carré, une énergie de deux dix

millièmes de gramme de charbon, tandis qu'un fourneau chauffé au rouge ( $500^{\circ}\text{C.}$ ) en donne quatre millièmes, ou que le filament d'une lampe ( $2000^{\circ}\text{C.}$ ) en donne presque un demi-gramme. Il est facile alors de calculer par extrapolation quelle devrait être la température d'un corps pour qu'il émette, comme le soleil, une énergie de 12 g. de charbon par minute, et l'on trouve environ  $6000^{\circ}$ .

Que pouvons-nous dire alors de la température qui règne au centre du soleil ? Les couches extérieures, perdant continuellement la grande quantité d'énergie mentionnée ci-dessus, se refroidiraient extrêmement rapidement si, de l'intérieur du soleil, il n'y avait pas un écoulement d'énergie et, pour que cet écoulement se produise, il est nécessaire que la température au centre soit beaucoup plus grande que  $6000^{\circ}$ . Eddington a calculé qu'il doit régner une température de 20 millions de degrés dans la partie centrale du soleil, que la densité de la matière y est six fois plus grande que celle du mercure et que la pression y atteint dix milliards d'atmosphères.

Mais laissons un instant ces nombres extraordinaires, que nous justifierons plus loin, et tâchons de comprendre comment le soleil, cette boule gazeuse extrêmement chaude, peut émettre par seconde une énergie que nous avons vu être de l'ordre de grandeur de celle contenue dans dix mille millions de millions de tonnes de charbons. Admettons tout d'abord que le soleil soit fait de charbon et que c'est ce charbon brûlant, c'est-à-dire s'oxydant, qui maintient le soleil à sa très haute température. Nous savons fort bien que cette hypothèse est fausse car, à la température du soleil, il n'y a plus de molécules, il n'y a même plus d'atomes, comme nous les connaissons (ionisation) et, par conséquent, les réactions chimiques ne sont plus possibles. Mais essayons tout de même, pour savoir si l'énergie mise en jeu pourrait provenir de phénomènes analogues à des réactions chimiques. Or, on calcule facilement avec les nombres mentionnés plus haut que, si le soleil fait de charbon avait été allumé au temps des Pharaons, il serait éteint depuis longtemps. L'énergie libérée par les réactions chimiques est donc tout à fait inadéquate pour expliquer la brillance du soleil, car nous savons que le soleil est beaucoup plus âgé que la civilisation égyptienne.

On a cru pendant un certain temps avoir trouvé la source d'énergie du soleil dans la gravitation. Sur le soleil, comme sur la terre, les corps ont un poids; ils sont attirés vers le centre de l'astre. Or le soleil étant gazeux et donc extrêmement élastique, il

va se contracter sous l'influence de cette force, les atomes vont tomber continuellement vers le centre du soleil et, dans cette chute, ils vont acquérir de l'énergie. Ainsi cette énergie de contraction gravitationnelle va augmenter la température des astres, puis être émise sous forme de radiation. Mais des calculs précis montrèrent bien vite que cette source d'énergie, quoique déjà beaucoup plus grande que celle résultant des réactions chimiques, est encore plus de mille fois trop petite.

Voilà où en était la question à la fin du siècle dernier. A ce moment, la découverte de la radioactivité vint apporter un espoir nouveau. En effet, on s'aperçut alors que, dans les profondeurs les plus intimes de la matière, dans les noyaux des atomes, il y avait une énergie cachée. Dans cette transmutation des éléments qu'est la radioactivité, une partie de cette énergie sortait de la masse, de la matière, suivant une relation établie par Einstein. Ainsi on pouvait croire que l'énergie stellaire avait sa source dans la matière même. Le soleil, alors, d'après l'équation d'Einstein, perdrait, en émettant son énergie, 4 millions de tonnes de sa masse à chaque seconde; mais sa masse étant si grande, cette perte serait négligeable et la matière contenue dans le soleil suffirait à le maintenir en vie pendant 15 mille milliards d'années. C'est là une source d'énergie plus que suffisante. Mais, malheureusement, la quantité de matière radioactive (principalement d'uranium et de thorium) contenue dans les étoiles est loin d'être suffisante pour maintenir celles-ci aux températures qu'on observe (elle suffit toutefois à maintenir l'intérieur de la terre à l'état de lave liquide). Ainsi, jusqu'en 1938, l'origine de la lumière et de la chaleur des étoiles est restée une énigme.

C'est vers cette époque que Gamow<sup>1</sup>, reprenant une idée émise quelques années auparavant par Atkinson et Houtermans, et avec

---

<sup>1</sup> Il est nécessaire que je mentionne ici les emprunts si nombreux que j'ai faits aux travaux suivants : Gamow, *Nuclear Energy Sources and Stellar Evolution*, Phys. Rev. 53, 595, 1938; Gamow, *Possibilities of Stellar Evolution*, Phys. Rev. 55, 718, 1939; Gamow and Teller, *Energy Production in Red Giants*, Phys. Rev. 55, 791, 1939; Bethe, *Energy Production in Stars*, Phys. Rev. 55, 434, 1939; Greenfield, *The Problem of Energy Production in Red Giants*, Phys. Rev. 60, 175, 1941, et surtout au livre de Gamow, *The Birth and Death of the Sun*, The Viking Press, New York, 1940, dont je me permets de recommander la lecture à la fois instructive et amusante à quiconque s'intéresse aux étoiles. Le style de Gamow et son humour russo-américain donnent à ce qu'il écrit une saveur toute particulière.



l'aide subséquente de Bethe, fit la liaison entre la température très élevée du centre des étoiles et les expériences de transmutation *artificielle* des éléments que, grâce en particulier au cyclotron, on avait réussi à produire au laboratoire.

En effet, la nature ne nous donne que fort peu d'exemples de radioactivité, de transmutation des éléments. Mais, durant ces dernières années, nous avons appris à former toutes sortes de nouveaux atomes, ou à transformer tous les atomes les uns dans les autres. Ce progrès dans nos connaissances est dû principalement à la technique, qui permet de lancer les noyaux d'atomes les uns contre les autres avec de très grandes énergies. Car, pour qu'une de ces transmutations se produise, pour qu'ait lieu une de ces réactions nucléaires, il faut en effet des énergies considérables, qui doivent vaincre les forces électriques avec lesquelles les noyaux qui sont positivement chargés se repoussent. Le cyclotron est une forme de ces canons à noyaux d'atomes, qu'on emploie pour bombarder d'autres atomes.

Comment donc ces transmutations se produisent-elles ? Un atome est formé d'un noyau (positivement chargé) entouré de tout un nuage d'électrons (négativement chargés). Par un phénomène qu'on appelle ionisation, on peut arracher ces électrons pour ne garder que le noyau. Supposons maintenant qu'on ait lancé un de ces noyaux, au moyen du cyclotron, sur d'autres noyaux qu'on veut transformer. En général, le noyau-projectile aura fort peu de chance de rencontrer un autre noyau car ceux-ci sont extrêmement petits, en fait cent millions de fois plus petits (en surface) que les atomes eux-mêmes. Le projectile, passant à travers les nuages d'électrons, arrache ceux-ci en perdant de l'énergie et bientôt il sera fortement ralenti et presque arrêté (après avoir passé à travers 100.000 atomes avec les énergies dont nous disposons actuellement). Mais admettons même que le projectile ait mis « dans le mille » et fasse une collision centrale avec un autre noyau. Pourra-t-il pénétrer dans celui-ci ? Cela dépendra de son énergie et de la charge électrique portée par lui et par le noyau cible. Si ces charges sont trop grandes, la répulsion sera très forte et la probabilité de pénétration et donc de réaction nucléaire sera très petite. Cette probabilité augmente rapidement avec l'énergie du projectile et diminue très rapidement avec une augmentation de charge. C'est pourquoi presque toutes les réactions nucléaires produites par cette méthode

emploient des noyaux d'hydrogène (charge la plus petite) comme projectiles et que seuls les atomes relativement légers peuvent être atteints par les énergies même considérables fournies par le cyclotron. On a pu montrer qu'un gramme de noyaux d'hydrogène devait avoir une énergie de 13 tonnes de charbon pour que chaque collision centrale sur un noyau de lithium permette la pénétration. Le nouvel atome, qui se forme après la pénétration, se décompose immédiatement en deux noyaux d'hélium, qui s'éloignent l'un de l'autre avec une énergie correspondant à celle du projectile et à la masse qui a disparu. Car, en effet, les deux noyaux d'hélium ont ensemble une masse plus petite que celles additionnées du noyau de lithium et du noyau d'hydrogène. *De la matière s'est donc transformée en énergie.*

Revenons alors aux températures énormes qui règnent à l'intérieur des étoiles. Nous avons vu qu'Eddington avait trouvé 20 millions de degrés au centre du soleil. Est-ce qu'à ces températures il ne serait pas possible que des réactions nucléaires se produisent spontanément ? Comme nous allons le voir, c'est bien ce qui se passe.

La température est, pour nous physiciens, une mesure de l'agitation atomique. Au zéro absolu ( $-273^{\circ}\text{C.}$ ), les molécules et les atomes sont immobiles; à  $0^{\circ}\text{C.}$ , ils se meuvent avec une énergie moyenne d'agitation qui, pour 1 g. d'hydrogène, correspond à l'énergie libérée par la combustion de 0,3 g. de charbon, et l'on calcule facilement qu'à 20 millions de degrés l'énergie moyenne atteint 100 kg. de charbon.

Evidemment, tous les atomes n'ont pas cette énergie; par le hasard des chocs certains ont une énergie très petite, d'autres, très peu nombreux, ont une énergie beaucoup plus grande que la moyenne. Les énergies sont distribuées parmi les particules du gaz suivant une loi statistique indiquée par Maxwell.

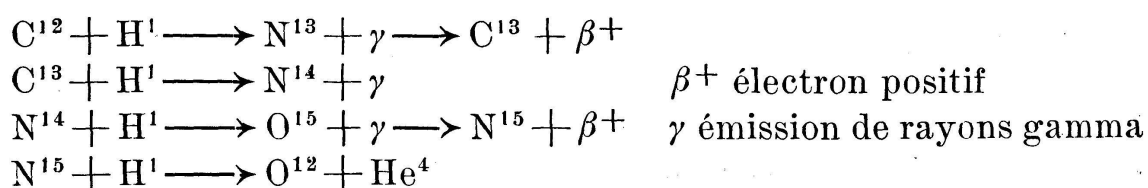
A l'intérieur des étoiles, nous l'avons vu, les noyaux des atomes sont ionisés, débarrassés de leurs électrons et les chocs entre les noyaux du fait de leur agitation thermique, seront donc beaucoup plus effectifs. D'autre part, vu la très grande densité de la matière (85 fois plus dense que l'eau), ces chocs se répéteront très souvent. Quoiqu'à l'énergie moyenne, 100 kg. de charbon, correspondant à 20 millions de degrés, la probabilité de pénétration d'un noyau dans l'autre lors du choc soit encore très faible (il fallait 13 tonnes de charbon pour que chaque collision centrale soit

effective), on peut concevoir que, pour les noyaux rapides et à cause du grand nombre de chocs, la réaction nucléaire ait quelque chance de se produire.

Tout cela peut évidemment se calculer très exactement grâce aux données numériques fournies par les expériences de laboratoire sur les transmutations artificielles, qui sont faites dans des conditions d'observation infiniment meilleures que celles qui règnent dans les étoiles. On trouve, à propos de la réaction hydrogène-lithium mentionnée ci-dessus, qu'un gramme de mélange (une partie d'hydrogène pour sept parties de lithium), en réagissant, libérerait une énergie correspondant à 10 tonnes de charbon. Mais, à 4000°, la réaction marcherait si lentement (il y aurait si peu de chocs effectifs) qu'il faudrait des milliards de milliards d'années pour que la réaction soit complète. Par contre, à 1 million de degrés, la vitesse de libération de l'énergie serait suffisante pour faire marcher une voiture automobile et, à 20 millions de degrés, la transformation hydrogène-lithium en hélium se ferait en quelques secondes et la libération de l'énergie prendrait alors la forme d'une terrible explosion.

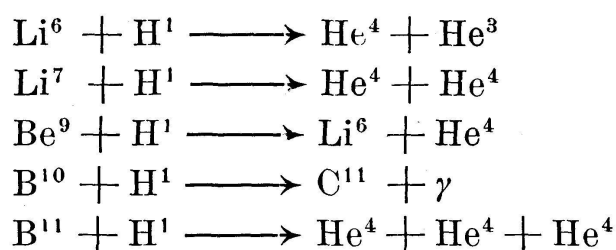
Cela est vrai pour des atomes légers. Si nous refaisons le même calcul pour la pénétration de l'hydrogène dans le chlore par exemple, nous trouverions que, même à 20 millions de degrés, la réaction prendrait dix millions de milliards de milliards d'années pour se faire.

Pour savoir ce qui se passe dans le soleil, il faut donc choisir, parmi toutes les réactions nucléaires possibles, celles qui, à 20 millions de degrés, vont dégager l'énergie qu'on sait être émise par le soleil. Or il se trouve qu'il n'y a qu'une réaction qui satisfait ces conditions, et qui les satisfait exactement. C'est en réalité une réaction en chaîne, décrite pour la première fois par Bethe. Deux sortes d'atomes, le carbone et l'azote, jouent le rôle de catalyseurs pour transformer l'hydrogène en hélium. Voici comment ces réactions s'écrivent (les nombres donnés en exposants sont les poids atomiques) :



Comme les quatre noyaux d'hydrogène ont ensemble une masse plus grande que celle du noyau d'hélium créé, de la matière s'est de nouveau transformée en énergie. C'est celle-ci qu'on retrouve dans les rayons  $\gamma$  et aussi dans l'énergie cinétique du noyau d'hélium. Toutes ces réactions ont été étudiées au laboratoire; on connaît très exactement et l'énergie libérée et la probabilité pour qu'elles aient lieu. Eh bien, on trouve qu'à 20 millions de degrés et en supposant qu'il y ait 35 % d'hydrogène et 1 % de carbone dans le soleil (nombres qui nous sont donnés par les astronomes), ces réactions libèrent exactement l'énergie émise par le soleil, que nous avons vu être de 10 mille millions de millions de tonnes de charbon.

D'autres réactions nucléaires plus effectives auraient pu avoir lieu dans le soleil mais, à la température de 20 millions de degrés, elles auraient donné lieu à des explosions (comme celles du lithium). Ces réactions sont :



Il faut donc qu'il n'y ait ni lithium (Li), ni beryllium (Be), ni bore (B) dans le soleil puisque la présence de ces éléments produirait l'explosion de notre astre. Or on trouve, en analysant la matière formant la croûte terrestre, environ 35 % d'hydrogène et quelques pour cent d'hélium, de carbone, d'azote, d'oxygène, etc. Tandis que le lithium, le bore et le beryllium sont infiniment plus rares, n'étant présents que dans la proportion de quelques millièmes de pour cent. La terre s'étant formée à partir du soleil, n'est-ce pas là une vérification remarquable de nos calculs ?

Mais alors, comment nous représentons-nous l'histoire hypothétique du soleil ? Au commencement, le soleil était une masse gazeuse froide, de grandes dimensions, contenant toutes sortes d'atomes mais surtout de l'hydrogène, l'élément le plus simple, le plus léger. Sous l'influence de la contraction, due à la gravitation, la température du centre s'est élevée jusqu'à ce que la réaction du

lithium ait commencé. Alors, avec une température centrale d'un ou deux millions de degrés, l'hydrogène s'est transformé en hélium et l'énergie libérée a créé une grande pression, suffisante pour empêcher la contraction. Remarquez alors à quelle belle machine à combustion d'atomes nous avons à faire. Les couches gazeuses externes relativement froides et attirées par la gravitation sont les parois de la chaudière, à l'intérieur de laquelle les transmutations et la transformation de la matière en énergie ont lieu. Et cette machine est autorégulatrice car, si la température est insuffisante pour amorcer la réaction nucléaire, la contraction se produit, qui tend à augmenter la température. Si, au contraire, la réaction marche trop vite, la température est trop élevée, une dilatation de l'astre a lieu, qui produit un refroidissement et donc une diminution de la vitesse de réaction. Avec une température centrale de l'ordre du million de degrés, la température des couches extérieures du soleil devait être de deux ou trois mille degrés et le soleil, de grande dimension, devait alors être d'une couleur rouge. Puis, les lithiums ayant été exploités à fond et ayant disparu, la contraction a continué jusqu'à donner une température plus élevée, pour laquelle la réaction du beryllium s'est amorcée, et cela a continué avec les bores. Cette évolution a dû se produire relativement rapidement puisque les éléments prenant part à la réaction disparaissent une fois pour toutes. Ensuite, c'est le cycle carbone-azote qui a fonctionné et qui fonctionne encore, et qui va durer jusqu'à épuisement de l'hydrogène, car, dans ce cycle, les éléments carbone et azote ne disparaissent pas, mais se renouvellent constamment. On peut prévoir que la proportion d'hélium augmentant, la matière du soleil devient plus opaque aux radiations à mesure que l'hydrogène disparaît et que, par conséquent, la partie de celles-ci emprisonnée dans l'étoile va augmenter, et sa température, et donc la vitesse de la réaction nucléaire. Ainsi le soleil va continuer à briller d'un éclat de plus en plus grand et Gamow a calculé que, dans dix milliards d'années, le soleil aura à peu près épuisé son hydrogène et qu'il brillera d'un éclat cent fois plus grand que celui qu'il a aujourd'hui, alors que sa grandeur n'aura pour ainsi dire pas changé. La vie à la surface de la terre est donc destinée à disparaître, non pas par la congélation conséquente à l'extinction du soleil, mais bien au contraire par la chaleur intenable due à un soleil cent fois plus éclatant.

L'hydrogène ayant disparu, la contraction de gravitation, une fois de plus, se mettra à jouer et le soleil, finalement, s'éteindra; mais nous ne savons pas encore très bien comment cela se fera.

Toute cette histoire semble très hypothétique. On a pu toutefois la vérifier, car les étoiles sont des « soleils » à différents stades de développement. Des calculs précis ont montré quelles étaient les étoiles relativement rares (géantes rouges) qui brûlaient encore du lithium, du bore et du beryllium et qui n'avaient pas encore suffisamment évolué pour employer le cycle carbone-azote. On a pu voir aussi les étoiles encore plus rares (naines blanches) approchant de la fin de leur existence. Enfin, on a reconnu que la plupart des étoiles (« main sequence ») étaient au stade évolutif du carbone-azote. Mais la place manque ici pour exposer ces résultats qui furent discutés d'une façon détaillée lors de cette conférence.