COURS

Cours élémentaire d'astronomie et d'astrophysique : VIII- Les étoiles mystérieuses.

Georges Paturel, Observatoire de Lyon

Résumé : *Ce n'est que vers les années 1930, que l'on a compris d'où les étoiles tiraient leur énergie. Nous essayons de comprendre la démarche qui a conduit les astronomes à penser que seule l'énergie nucléaire pouvait expliquer le rayonnement des étoiles.*

Introduction

Lors du cours précédent, cours assez difficile si vous vous souvenez bien, nous avons montré comment les physiciens et les astronomes ont pu comprendre quantitativement les spectres stellaires.

Ces spectres portent une information extraordinaire sur la composition des astres et sur leurs mouvements. Mais un problème crucial se pose encore : D'où les étoiles tirent-elles leur énergie ?

Petit rappel sur les unités et sur les notations

Une puissance est une énergie par unité de temps. Une puissance est donc mesurée en Joule par seconde. On appelle cette unité des Watts. Une étoile envoie de l'énergie. En une seconde une étoile envoie une certaine quantité d'énergie dans toutes les directions. On dit qu'elle rayonne une certaine puissance. C'est sa luminosité.

Nous aurons à manipuler des nombres très grands. Nous les noterons avec les puissances de dix, comme nous l'avons fait souvent. 3×10^{26} signifie 3 suivi de 26 zéros. On a ainsi, par ex. : $(3\times10^{10})(2\times10^{12})= 6\times10^{22}$

Les savants avaient compris que l'âge du Soleil et de la Terre, était de plusieurs milliards d'années. Pour preuve, il y avait les fossiles, la salinité des mers, l'évolution géologique. Pendant tout ce temps le Soleil rayonnait avec une puissance considérable. Il est facile de calculer cette puissance en mesurant l'énergie reçue sur Terre à chaque seconde pour une surface donnée. Connaissant la distance Terre Soleil on peut calculer combien de mètres carrés sont ainsi "arrosés" d'énergie. Le résultat est spectaculaire : de l'ordre du milliard de milliard de milliard de Watts. Cette mesure, assez simple à effectuer, a été proposée il y a bien longtemps dans les Cahiers Clairaut. Refaisons le calcul brièvement.

On peut mesurer que chaque mètre carré sur la Terre, bien exposé au Soleil, reçoit environ 1000 Joules par seconde. La puissance reçue est de 1000 Watts par mètre carré. C'est l'équivalent d'un bon radiateur électrique. On note au passage que sur un toit de maison il y a largement de quoi se chauffer. Or le Soleil est à 150 millions de kilomètres de la Terre. Donc, chaque mètre carré de la sphère de rayon R=150 Mkm centrée sur le Soleil reçoit 1000 Watts. Si vous calculez le nombre de mètres carrés ($S=4\pi R^2$) vous trouvez $S=3\times10^{23}m^2$. Donc la puissance que doit fournir le Soleil pour envoyer toute cette énergie à tous ces mètres carrés à chaque seconde est de : $1000\times3\times10^{23}= 0{,}3\times10^{27}$, soit 0.3 milliard de milliards de milliards de Watts.

Si le Soleil brûlait un combustible comme le méthane, dans une combustion classique avec de l'oxygène, quelle serait sa durée de vie ? En adoptant approximativement une énergie de dix millions de Joules par kilogramme, on trouve qu'une masse comme celle du Soleil (2×10^{30} kg) pourrait fournir les 3×10^{26} Watts pendant 70 milliards de secondes, c'est-à-dire 2000 ans. Ce n'est donc pas là l'origine de cette mystérieuse énergie.

Une autre solution fut imaginée par Helmholtz et Kelvin. Le Soleil s'effondrerait sur lui-même, transformant son énergie potentielle en chaleur, permettant ainsi au Soleil de rayonner. Le Soleil est si gros, qu'une faible contraction suffit à produire une puissance considérable.

Essayons de faire le calcul approximativement, pour voir si nous retrouvons les résultats de Helmholtz et Kelvin. L'énergie que libère une masse s'effondrant sous sa propre masse peut se calculer. Le calcul n'est pas élémentaire mais nous nous contenterons d'un simple ordre de grandeur. L'énergie gravitationnelle libérée est égale à $E=2GM^2/R$. Nous ne démontrerons pas cette relation que nous admettrons telle quelle. M est la masse du Soleil, R son rayon actuel et G la constante de la gravitation. Nous rappelons que, si nous exprimons les masses en kilogrammes, les énergies en Joules, les longueurs en mètres et les temps en secondes, G vaut $6{,}67\ 10^{-11}$ (en unités de ce système international). On trouve alors que pour le Soleil, l'énergie totale libérée depuis sa formation, par le simple fait de sa contraction gravitationnelle est de 8×10^{41} Joules. Si je divise par la puissance rayonnée par le Soleil (en supposant qu'il a toujours rayonné de la même manière), je vais trouver le nombre de secondes de rayonnement. Nous avons dit que le Soleil rayonne 3×10^{26} Watts, donc il a pu le faire ainsi pendant : $8\times10^{41}/3\times10^{26} = 3\times10^{15}$ secondes, c'est-à-dire : 95 millions d'années. Helmholtz et Kelvin avaient trouvé 100 millions d'années. C'est indiscutablement une source d'énergie importante, mais là encore, la durée de vie est très inférieure à ce qu'il faut pour expliquer le rayonnement de notre Soleil. Ce n'était donc pas la solution à cette énigmatique source d'énergie.

Equivalence masse et énergie

Einstein a déduit une relation étonnante $E=m.c^2$. Cette relation montre l'équivalence entre énergie et masse. Si cette énergie peut se libérer, et nous verrons comment cela peut se faire naturellement, la masse est alors une source gigantesque d'énergie, propre peut-être à alimenter une étoile pendant des milliards d'années.

Dans le précédent Cahier (CC 111), nous avions présenté une des démonstrations originales de cette relation emblématique. Elle ne faisait appel qu'à des notions qui existaient avant sa fameuse théorie de la relativité restreinte (aberration de la lumière, pression de radiation et conservation de la quantité de mouvement). D'ailleurs, lors de notre dernière Assemblée Générale à Rouen, notre ami R. Cavaroz, nous a signalé un fait intéressant : la célèbre relation avait déjà été établie par P. Langevin. L'idée était dans l'air, la masse est un formidable réservoir d'énergie : du concentré d'énergie. Calculons l'énergie d'un kilogramme. $E=m.c^2$ conduit à $E=9\times10^{16}$ Joules. C'est 10 milliards de fois plus d'énergie que ce que fournirait la même masse du mélange méthane+oxygène. Le Soleil pourrait vivre 20 000 milliards d'années en convertissant toute sa masse en énergie. Mais nous allons voir que toute la masse n'est pas convertie. Mais une toute petite fraction seulement de cette masse suffit amplement à faire vivre notre Soleil, confortablement.

Les réactions nucléaires

L'observation des spectres a montré aux astronomes que l'Hydrogène, cet élément d'une grande simplicité (un électron tournant autour d'un proton), est présent partout. La masse volumique des étoiles, (que les astronomes appellent abusivement la densité), montre que les étoiles sont essentiellement faites d'Hydrogène et d'Hélium avec des traces d'éléments chimiques plus lourds. Peut-on imaginer que l'Hélium, qui a une masse environ quatre fois plus grande que celle d'un atome d'Hydrogène, est fabriqué à partir de quatre atomes d'Hydrogène. Si c'était ainsi, quel serait le bilan énergétique de cette fabrication. Absorberait-elle de l'énergie ou au contraire en libérerait-elle ? Essayons de le calculer.

La masse atomique d'un atome d'Hydrogène est de 1,00813 g par mole (une mole est un paquet de 6×10^{23} atomes vrais). Donc quatre atomes d'Hydrogène ont une masse de 4,03252 g (toujours par mole). Or un atome d'Hélium a une masse de 4,00389 g. Donc les quatre atomes d'Hydrogène donnent un atome d'Hélium et il reste 0,02862 g. Si cette petite différence de masse est convertie en énergie, à chaque fabrication d'un atome d'Hélium, il se libère une énergie de :

$$\frac{0.02862\times10^{-3}}{6\times10^{23}}(3\times10^{8})^{2} = 4{,}3\times10^{-12}\ \textit{Joules}$$

Vous avez reconnu la relation $E=m.c^2$, avec la masse convertie en kg par atome vrai et la vitesse de la lumière en m/s.

On peut se demander quelle masse d'Hydrogène doit être convertie en Hélium pour produire le rayonnement actuel du Soleil. Nous avons vu qu'à chaque seconde le Soleil fournit 4×10^{26} Joules puisque sa puissance est de 4×10^{26} Watts.

Ce n'est pas compliqué. Il faut fabriquer à chaque seconde $(4\times10^{26}) / (4\times10^{-12})$ atomes vrais d'Hélium.

Et il faut donc convertir 4 fois plus d'atomes d'Hydrogène, c'est-à-dire environ 4×10^{38} atomes d'Hydrogène par seconde. Sachant que 6×10^{23} atomes d'Hydrogène ont une masse de 1,00813 g, on trouve aisément que le Soleil convertit, à chaque seconde, une masse de : 666 milliards de kilogrammes d'Hydrogène (en gros 700 millions de tonnes par seconde) en Hélium.

Cette valeur nous paraît énorme. Mais pour le Soleil, ce n'est presque rien, la masse du Soleil étant, rappelons le, de 2×10^{30} kg. Nous allons calculer la durée de vie du Soleil si nous nous basons sur ce mécanisme de conversion Hydrogène en Hélium. Nous allons supposer que seulement la moitié de la masse du Soleil est transformée en Hélium, car nous verrons plus tard que d'autres mécanismes entrent en jeu, qui vont modifier le déroulement simple du processus. Le calcul est simple :

$$1/2\,\frac{2\times10^{30}}{666\times10^{9}} = 1{,}5\times10^{18}\ \sec ondes$$

C'est-à-dire environ 48 milliards d'années. On est totalement rassuré, notre Soleil a de la réserve pour briller encore longtemps comme aujourd'hui.

Comment convertir l'Hydrogène en Hélium

Le mécanisme que nous venons de voir a été proposé dans les années 1930. Vous notez au passage que la compréhension du rayonnement des étoiles est très récente, puisque les plus vieux de nos lecteurs sont nés quand on ne savait pas encore expliquer d'où provenait la mystérieuse énergie des étoiles.

Nous avons le mécanisme mais il nous manque encore un détail. Comment cette transformation se fait-elle ? En effet, pour faire fusionner quatre atomes d'Hydrogène ce n'est pas facile. Les noyaux de ces atomes sont des protons, chargés positivement. Quand les protons arrivent l'un près de l'autre ils se repoussent énergiquement. Quelle force peut bien les contraindre à fusionner ?

On peut dire que c'est le mécanisme de Helmholtz et Kelvin qui joue le rôle d'amorce. Le nuage d'Hydrogène primordial se contracte sous l'effet de la gravitation. Une énergie considérable est libérée qui échauffe le gaz à un point tel que les protons acquièrent une grande vitesse d'agitation. Quand la température et les vitesses sont suffisantes les protons peuvent fusionner. Les réactions nucléaires peuvent commencer. Ces réactions se produisent à quelques millions de degrés.

La gravitation devrait continuer de concentrer l'étoile, mais l'énergie générée au cœur de l'étoile naissante produit une pression qui freine et empêche la contraction. L'étoile est stable et la fusion se propage vers la périphérie, le cœur de l'étoile étant fait maintenant d'Hélium.

Pour être un peu plus précis, la transformation Hydrogène en Hélium passe par des étapes intermédiaires, plus faciles à réaliser, mais le bilan est le même, quatre atomes d'Hydrogène donnent un atome d'Hélium. C'est le mécanisme que les hommes aimeraient pouvoir produire sur Terre de manière contrôlée, le fameux projet ITER. C'est bête, mais les hommes ont d'abord su exploiter ce mécanisme, de manière non contrôlée, pour faire des bombes, ce qu'on appelle les bombes 'H'.

Le cœur des étoiles est très chaud mais nous ne voyons que la partie superficielle, ce que l'on appelle l'atmosphère de l'étoile, dont la partie profonde et chaude est vue à travers les couches superficielles plus froides. Nous comprenons pourquoi des raies spectrales sont visibles.

■