

Etoiles: vie et mort

**Quantités utiles:**

Masse du Soleil:  $M_{\odot} = 2 \times 10^{30}$  kg

Rayon du Soleil:  $R_{\odot} = 7 \times 10^5$  km

Luminosité du Soleil:  $L_{\odot} = 4 \times 10^{26}$  W

Température effective du Soleil:  $T_{\odot} = 5770$  K

Masse du proton:  $m_p = 1.67 \times 10^{-27}$  kg

Masse du neutron:  $m_n \approx m_p$

Masse de l'électron:  $m_e \approx m_p/1840$

Constante de Boltzmann:  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J K<sup>-1</sup>

Vitesse de la lumière:  $c = 3.00 \times 10^8$  m sec<sup>-1</sup>

Constante de gravitation:  $G = 6.67 \times 10^{-11}$  m<sup>3</sup> sec<sup>-2</sup> kg<sup>-1</sup>

etc...

**1- Pression à l'intérieur du Soleil.**

Estimer simplement la pression typique à l'intérieur du Soleil, due à la gravité de l'étoile. L'exprimer en bar.

**2- Température à l'intérieur du Soleil.**

Estimer simplement la température typique à l'intérieur du Soleil.

**3- Temps de vie chimique du Soleil.**

Si le Soleil tirait son énergie de réactions chimiques, estimer sa durée de vie (on prendra pour ordre de grandeur des niveaux électroniques autour du noyau,  $e_{\text{chim}} \sim 1$  eV). Conclusion?

**4- Temps de vie gravitationnel du Soleil.**

Si le Soleil tirait son énergie d'une contraction lente, estimer sa durée de vie (ou temps de Kelvin-Helmholtz). Conclusion?

**5- Température de fusion thermonucléaire.**

Pour pouvoir fusionner, deux protons doivent s'approcher l'un de l'autre à une distance de l'ordre du Fermi ( $10^{-15}$  m). Estimer la température nécessaire du gaz pour que de telles distances d'approche soient possibles. On prendra pour expression de la force électrostatique (loi de Coulomb):  $F_{\text{elec}} = 1/4\pi\epsilon_0 \cdot qq'/r^2$  N, avec  $1/4\pi\epsilon_0 = 9 \times 10^9$  uSI, et pour la charge de l'électron  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  C.

Comparer au résultat de l'exercice 2-. Pourquoi les réactions thermonucléaires sont-elles quand même possibles dans le Soleil?

**6- Temps de vie nucléaire du Soleil.**

Lors de la réaction de fusion nucléaire  $p^+ + p^+ + p^+ + p^+ \longrightarrow {}^4\text{He}$ , il y a une perte de masse de  $0.028m_p$ . Estimer la durée de vie du Soleil, sachant que seulement  $f=10\%$  de la masse du Soleil participe aux réactions nucléaires, au centre de l'astre, et que le Soleil est essentiellement composé d'hydrogène.

### 7- Super géantes rouges.

Estimer le rayon de Bételgeuse, sachant que sa luminosité vaut  $L \approx 3 \times 10^5 L_\odot$  et que sa température photosphérique effective est de  $T \approx 3500$  K. (On donnera ce rayon en UA).

Estimer le diamètre angulaire de Bételgeuse (en seconde d'arc), sachant que cette étoile se trouve à environ 150 pc de nous. Ce diamètre est-il facilement observable?

Estimer la masse volumique moyenne de Bételgeuse, sachant que sa masse est de l'ordre de  $20 M_\odot$ . Qu'en pensez-vous?

### 8- Naines blanches.

On observe une naine blanche de même type spectral que le Soleil, mais qui est 10 magnitudes absolues plus faible que lui. Quel est son rayon? En supposant que sa masse est du même ordre que celle du Soleil, estimez sa masse volumique. Qu'en pensez-vous?

### 9- Relation masse-luminosité.

On considère une étoile de la séquence principale, de masse  $M$ , de rayon  $R$  et de luminosité  $L$ . On se propose de montrer que  $L$  est proportionnelle au cube de sa masse  $M$ ,  $L \propto M^3$ .

Pour cela, on utilisera le fait qu'à l'intérieur du Soleil, les photons se déplacent via un processus de marche au hasard, et que la densité d'énergie sous forme de photons,  $e_{\text{ray}}$ , vaut  $e_{\text{ray}} = 4\sigma T^4/c$  (loi de Stefan volumique, où  $\sigma$  est la constante de Stefan et  $c$  la vitesse de la lumière).

Comment varie alors la durée de vie d'une étoile de la séquence principale en fonction de sa masse?

### 10- Taille des naines blanches, des étoiles à neutrons.

Les naines blanches sont des astres où les réactions nucléaires se sont éteintes, et qui sont maintenues par la pression de Fermi (ou de dégénérescence)  $P_F(e^-)$  des électrons. Cette pression, d'origine quantique, découle du principe d'incertitude d'Heisenberg, et provient aussi du fait que les électrons sont de fermions. Elle a pour expression:

$$P_F(e^-) = \frac{C}{m_e} \rho^{5/3},$$

où  $\rho$  est la masse volumique de l'astre,  $m_e$  est la masse de l'électron et  $C \approx 3 \times 10^{-24}$  uSI est un terme qui dépend de différentes constantes physiques (constante de Planck, masse des nucléons, etc...).

Estimer alors le rayon d'une naine blanche de masse solaire.

Même question avec une étoile à neutrons de masse  $1.4M_\odot$ . Dans un tel astre, les électrons ont disparu, et c'est maintenant la pression de Fermi des neutrons,  $P_F(n) = C\rho^{5/3}/m_n$ , qui maintient l'étoile à neutrons,

### 11- Temps de chute libre d'une naine blanche.

Lorsque la masse d'une naine blanche dépasse  $\approx 1.4M_\odot$  (masse de Chandrasekhar), on montre que les électrons peuvent fusionner avec les protons pour former des neutrons (phénomène de neutronisation). La pression de Fermi des électrons disparaît alors, et la naine blanche implose en s'effondrant sur elle-même en chute libre (début du phénomène de supernova).

Estimer simplement ce temps de chute libre.