

Module M1, Astronomie-Astrophysique
Université Pierre et Marie Curie
année 2006-2007
Bruno Sicardy

NOM:
Prénom:
Section:

Questions de cours, 11 janvier 2007

Durée de l'épreuve: 15 mn

Documents et calculettes *non* autorisés

1- Donner le nom des quatre interactions fondamentales actuellement connues, par ordre croissant d'intensité.

2- Donner l'expression de la loi de Stefan surfacique, de la loi de Stefan volumique.

TSVP

3- Donner, à l'aide d'un petit schéma explicatif, la définition précise de l'intensité lumineuse I .

4- Quelle est l'origine du "rayonnement à 21 cm" ?

5- Donner la définition de l'épaisseur optique.

Problème, 11 janvier 2007

Durée de l'épreuve: 45 mn

Documents *de cours* et calculettes autorisés

Quelques valeurs numériques utiles:

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

Constante de Stefan: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W m⁻² K⁻⁴

Constante de Boltzmann: $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J K⁻¹

Vitesse de la lumière: $c = 3 \times 10^8$ m sec⁻¹

Luminosité du Soleil: $L_\odot = 3.83 \times 10^{26}$ W

Rayon du Soleil: $R_\odot = 7 \times 10^8$ m

(d'autres quantités sont disponibles dans votre cours si nécessaire).

NB. Plusieurs des questions posées sont indépendantes. On peut donc répondre à certaines questions sans avoir traité les précédentes. Justifier soigneusement le raisonnement physique.

Centre du Soleil

On considère un modèle simplifié du centre du Soleil, composé uniquement d'hydrogène complètement ionisé, et en équilibre thermodynamique (on néglige en particulier la présence de l'hélium).

1- Montrer que la pression thermique p_{the} due à la matière au centre du soleil est $p_{\text{the}} \sim 2\rho kT/m_p$, où ρ est la masse volumique du milieu, k la constante de Boltzmann, T la température et m_p la masse du proton.

D'où vient le facteur 2 dans cette expression?

2- Montrer que la densité d'énergie contenue dans la matière sous forme thermique dans un tel milieu est $e_{\text{the}} = 3p/2$.

3- On estime que la température au centre du Soleil est de 12 millions de degrés Kelvin et que la masse volumique y est de $\rho = 1.5 \times 10^5$ kg m⁻³.

Evaluer alors la densité d'énergie e_{the} définie dans **2-**.

4- Rappeler l'expression de la densité d'énergie e_{rad} sous forme radiative (photons) dans un tel milieu.

Evaluer e_{rad} au centre du Soleil.

5- La densité d'énergie au centre du Soleil est-elle dominée par l'agitation thermique des particules, ou par l'énergie radiative des photons?

Et par conséquent, le poids du Soleil est-il supporté par la pression thermique, ou par la pression de radiation?

6- Les photons produits au centre du Soleil (par les réactions nucléaires) diffusent vers la surface du Soleil, en un temps de diffusion t_{diff} . Arrivés à la surface, ils sont évacués dans tout l'espace et sur tout le spectre à un taux L_{\odot} (W), appelé *luminosité* du Soleil.

Expliquer physiquement la formule: $\bar{e}_{\text{rad}} \times V = t_{\text{diff}} \times L_{\odot}$, où \bar{e}_{rad} est la densité radiative moyenne à l'intérieur du Soleil, et V son volume.

7- On considèrera que la température interne moyenne du Soleil est de $\bar{T} = 5 \times 10^6$ K, pour prendre en compte le fait que les zones externes du Soleil sont moins chaudes que les zones centrales.

Evaluer alors t_{diff} , en secondes et en années.

8- Comparer t_{diff} au temps que mettrait le photon pour sortir du Soleil si ce dernier était transparent.

Peut-on dire que l'intérieur du Soleil est opaque?

Questions Phytém seulement (15 mn)

9- On rappelle que lors d'un processus de diffusion (marche au hasard), la distance parcourue apres N collisions est de $d = \sqrt{N} \times l$, où l est le libre parcours moyen.

Montrer alors que le nombre total N_{diff} de collisions subies par un photon entre le moment où il est produit au centre du Soleil et le moment où il est émis dans l'espace à la surface vaut $N_{\text{diff}} = (c \cdot t_{\text{diff}} / R_{\odot})^2$.

Evaluer N_{diff} .

10- Evaluer le libre parcours moyen d'un photon à l'intérieur du Soleil.

Sur quelle échelle de distance la matière à l'intérieur du Soleil est-elle opaque?

corrigé succinct

1- $p = nkT$ où $n = n_p + n_e =$ densité totale de particules, ici protons et électrons, dans l'hypothèse où il n'y a pas d'hélium. Neutralité électrique $n_p = n_e \rightarrow n = 2n_p$, et comme masse essentiellement dans protons, $\rho \sim n_p m_p$, d'où $p = 2\rho kT/m_p$

2- Particules simples (pas d'énergie de rotation) \rightarrow énergie cinétique/particule $= 3kT/2$, $p = nkT$, d'où $e_{\text{the}} = 3p/2$

3- $e_{\text{the}} = 3\rho kT/m_p \sim 4 \times 10^{16} \text{ J m}^{-3}$

4- $e_{\text{rad}} = 4\sigma T^4/c$ (Stefan volumique), $\sim 2 \times 10^{13} \text{ J m}^{-3}$, donc densité d'énergie au centre du Soleil largement dominée par la pression thermique de la matière

5- Pression \sim densité d'énergie (plus précisément, $2e_{\text{the}}/3$ pour thermique et $e_{\text{rad}}/3$ pour radiation). Donc poids du Soleil supporté par pression thermique (elle-même alimentée par réactions nucléaires). NB. pour les étoiles trop massives, e_{rad} devient trop grand, et l'étoile explose. Ceci limite les étoiles les plus massives à 50-100 M_{\odot}

6- Il s'agit d'un processus de diffusion. L'énergie radiative contenue à un moment donné dans le Soleil est de $\bar{e}_{\text{rad}} \times V$. Cette énergie est évacuée par diffusion sur un temps de t_{diff} à un taux de L_{\odot} , donc une énergie évacuée $= t_{\text{diff}} \times L_{\odot}$. Etat stationnaire \rightarrow l'énergie évacuée est exactement remplacée, d'où $\bar{e}_{\text{rad}} \times V = t_{\text{diff}} \times L_{\odot}$

7- $t_{\text{diff}} = \bar{e}_{\text{rad}} \times V/L_{\odot} \sim 2 \times 10^{12} \text{ sec} \sim 50000 \text{ ans}$, où on prend $\bar{e}_{\text{rad}} = 4\sigma T^4/c$

(donc si la production de photons s'arrêtait brutalement au centre du Soleil, on s'en apercevrait seulement après ~ 50000 ans).

8- $t_{\text{trans}} = R_{\odot}/c \sim 2.3 \text{ sec}$. Il y a donc un rapport $t_{\text{diff}}/t_{\text{trans}} \sim 10^{12}$, énorme. L'intérieur du Soleil est extrêmement opaque. (Heureusement pour nous, car rayons γ produits au centre stériliserait la Terre). NB. le Soleil est transparent pour les neutrinos produits au centre par réactions nucléaires, ils arrivent sur Terre en qq 8 mn. Inoffensifs car n'interagissent quasiment pas avec la matière.

9- Pour sortir du Soleil, $x = R_{\odot}$, soit $N_{\text{diff}} = (R/l)^2$, mais $t_{\text{diff}} = N_{\text{diff}} l/c = \sqrt{N_{\text{diff}}} R_{\odot}/c$ et donc $N_{\text{diff}} = (c \cdot t_{\text{diff}}/R_{\odot})^2$

$N_{\text{diff}} \sim 7 \times 10^{23}$, nombre énorme...

10- $l = R_{\odot}/\sqrt{N_{\text{diff}}} \sim 1 \text{ mm}$. Donc intérieur du Soleil est opaque sur des distances de qq mm. Confirme question **8-**: l'intérieur du Soleil est extrêmement opaque.