PHY AST – Astrophysique

SECTION 9

QUESTIONS

Q1 Expliquez ce qu'est une étoile.

Q2 Qu'est-ce qu'un plasma ?

Q3 Donnez deux raisons distinctes qui indiquaient que l'âge du Soleil devait être d'au moins plusieurs centaines de millions d'années.

Q4 Qu'est-ce que la contraction de Kelvin-von Helmholtz ?

Q5 Que peut-on dire sur la masse des produits d'une réaction nucléaire pour que celle-ci libère de l'énergie ?

Q6 Quel est le nom de la force qui permet de maintenir la cohésion dans un noyau atomique ?

Q7 Quelle est la différence entre la fusion nucléaire et la fission nucléaire ?

Q8 Quel est l'élément chimique le plus stable ? Pour quelle raison le noyau de cet élément est-il le plus stable ?

Q9 Expliquez quand est-ce qu'une réaction de fusion nucléaire libère de l'énergie et quand est-ce qu'une réaction de fission nucléaire libère de l'énergie. (*Indice : cela est en lien avec la réponse à la question précédente.*)

Q10 Que représente le rendement énergétique d'une réaction nucléaire ? Quelles sont ses unités ?

Q11 Expliquez ce qu'est un processus β^+ et un processus β^-.

Q12 Expliquez ce qu'est un processus α.

Q13 **(a)** Écrivez la réaction globale qui correspond à la chaîne proton-proton ?
(b) Écrivez la réaction globale qui correspond au cycle CNO ?
(c) Laquelle des deux réactions précédente possède le plus grand rapport énergétique ? Pourquoi ?

Q14 On sait que le cycle CNO s'effectue actuellement dans le coeur du Soleil et que cette réaction nucléaire nécessite la présence d'atomes de carbone qui agissent comme catalyseurs. Or, nous savons également que le Soleil ne produit pas carbone. Expliquez alors d'où provient le carbone actuellement présent dans le Soleil.

Q15 Expliquez comment des éléments lourds comme l'argent ($Z = 47$) et l'or ($Z = 79$) arrivent à se former dans la nature sachant pourtant que les étoiles effectuent des réactions de fusions nucléaires qui ne produisent jamais d'éléments plus lours que le fer ($Z = 26$).

Q16 **(a)** Combien de temps met typiquement un photon pour sortir du Soleil ? Pourquoi est-ce si long ?
(b) Combien de temps met typiquement un neutrino pour sortir du Soleil ? Pourquoi est-ce si court ?

Q17 Expliquez comment on peut obtenir de l'information sur les couches internes du Soleil.

Q18 Pourquoi considère-t-on que les taches solaires sont des endroits où surviennent de fortes émissions d'énergie alors qu'elles émettent pourtant beaucoup moins de lumière visible que la moyenne de la surface solaire ?

EXERCICES

9.1 **Un temps de vie qui disparait en fumée.** Le rendement énergétique de la combustion du charbon est $R = 30\,000\,000\,\mathrm{J/kg}$. Si le Soleil (un objet dont la masse est $m = 1\,\mathrm{M}_\odot$) était constitué exclusivement de charbon, calculez pendant combien d'années pourrait-il briller tout en maintenant sa luminosité actuelle.



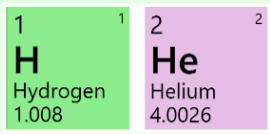
9.2 **Un temps de vie trop contracté.** Une sphère de masse M et de rayon R possède une énergie potentielle gravitationnelle :

$$U_\mathrm{g} = -\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}$$

(ce résultat sera démontré à l'exercice 9.9). En supposant que par la contraction de Kelvin-von Helmholtz toute l'énergie potentielle gravitationnelle du Soleil puisse être émise sous forme de rayonnement, calculez pendant combien d'années pourrait-il briller tout en maintenant sa luminosité actuelle.

9.3 **Un temps de vie relativement correct.** Le rendement énergétique de la fusion de l'hydrogène en hélium est $R = 6,17 \times 10^{14}\,\mathrm{J/kg}$. En supposant qu'une masse d'hydrogène équivalente à 10 % de la masse du Soleil puisse être ainsi convertie en énergie au cours de sa vie, calculez pendant combien d'années pourrait-il briller tout en maintenant sa luminosité actuelle.

9.4 **Le rendement énergétique de la chaine proton-proton.** Calculez le rendement énergétique de la réaction globale ci-dessous qui représente le résultat la fusion de l'hydrogène en hélium à partir de la chaine proton-proton. La masse d'un noyau d'un noyau d'hélium vaut $3,972600\,m_\mathrm{p}$.



$$4\,{}^1\mathrm{H} \;\rightarrow\; {}^4\mathrm{He} + \text{énergie}$$

Remarque utile : si vous consultez un tableau périodique (voir image ci-contre), remarquez que les masses molaires qui sont données ne correspondent pas aux mêmes valeurs que celles qu'on donne en unités de masse du proton (1 pour l'hydrogène et environ $3,97$ pour l'hélium). Sans entrer dans les détails, les masses qui sont données dans le tableau périodique peuvent être considérées en unités de masse atomique (ou Dalton) : ($1\,\mathrm{u} = 1,660539 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$). Si on exprime la masse du proton en unités de masse atomiques (en prenant 7 chiffres significatifs pour faire le calcul), on obtient $m_\mathrm{p} = 1,007276\,\mathrm{u}$. Cela permet de remarquer que $4,0026\,\mathrm{u} \approx 3,97\,m_\mathrm{p}$.

9.5 **L'énergie libérée par le processus triple alpha.** Certaines étoiles parviennent à synthétiser du carbone par le processus triple alpha :

$$^4\text{He} + {}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$$

La masse d'un noyau d'hélium vaut $3,972600\,m_\text{p}$ et la masse d'un noyau de carbone vaut $11,910048\,m_\text{p}$.
(a) Cette réaction est-elle endothermique ou exothermique ?
(b) Quel est le rendement énergétique de cette réaction ?
(c) Quelle quantité d'énergie peut-on obtenir à partir de tout l'hélium du Soleil ? (On suppose que 27 % de la masse du Soleil est sous forme d'hélium.)
(d) Pendant combien de temps le Soleil pourrait-il briller avec sa luminosité actuelle s'il tirait toute son énergie de la fusion de l'hélium ?

9.6 **Le rendement énergétique de la fusion de l'oxygène.** Lorsque la contraction du coeur d'une étoile est assez importante pour atteindre une température de 1 500 000 000 K (ce qui n'est pas le cas pour le Soleil), deux atomes d'oxygène peuvent fusionner ensemble pour produire du silicium suivant la réaction ci-dessous :

$$^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{28}\text{Si} + {}^4\text{He}$$

Quel est le rendement énergétique de cette réaction sachant que la masse d'un noyau d'oxygène vaut $15,875008\,m_\text{p}$, la masse d'un noyau de silicium vaut $27,767208\,m_\text{p}$ et la masse d'un noyau d'hélium vaut $3,972600\,m_\text{p}$?

9.7 **La combustion d'un litre d'essence.** Un litre d'essence a une masse d'environ $0,75\,\text{kg}$ et produit $34 \times 10^6\,\text{J}$ d'énergie lorsqu'on l'utilise dans un moteur d'automobile. Combien de fois plus d'énergie serait produite si on pouvait convertir cette quantité d'essence via l'équation $E = mc^2$?

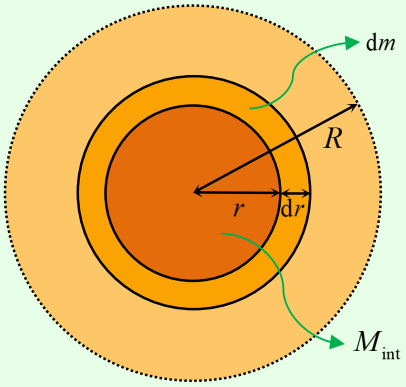
9.8 **L'énergie annuelle produite par le barrage LG-2.** Le barrage LG-2 de la Baie James génère $5,3\,\text{GW}$ (G = giga = 10^9). Quelle est la masse qui, convertie totalement en énergie, équivaudrait à la production d'énergie annuelle de LG-2 ?

9.9 **Exercice facultatif : L'énergie potentielle d'une sphère.** Montrez qu'une étoile de masse M et de rayon R ayant une masse volumique ρ constante possède une énergie potentielle gravitationnelle :

$$U_\text{g} = -\frac{3}{5}\frac{GM^2}{R}$$

Indice : On peut exprimer l'énergie potentielle gravitationnelle entre une coquille sphérique de rayon r, de masse $\text{d}m$ et d'épaisseur $\text{d}r$ et la masse « à l'intérieur » M_int de la coquille comme étant :

$$\text{d}U_\text{g} = -\frac{GM_\text{int}\text{d}m}{r}$$



RÉPONSES

9.1 La masse de charbon disponible serait $m = 1\,\mathrm{M}_\odot = 1,99 \times 10^{30}\,\mathrm{kg}$

L'énergie totale disponible serait $E = R \times m = 5,970 \times 10^{37}\,\mathrm{J}$

Le Soleil pourrait briller pendant un temps $\Delta t = \dfrac{E}{1\,\mathrm{L}_\odot} = 1,559 \times 10^{11}\,\mathrm{s} = 4\,940\,\mathrm{ans}$

9.2 L'énergie totale disponible serait $E = |U_\mathrm{g}| = \dfrac{3}{5}\dfrac{G\mathrm{M}_\odot^2}{\mathrm{R}_\odot} = 2,277 \times 10^{41}\,\mathrm{J}$

Le Soleil pourrait briller pendant un temps $\Delta t = \dfrac{E}{1\,\mathrm{L}_\odot} = 5,945 \times 10^{14}\,\mathrm{s} = 1,88 \times 10^{7}\,\mathrm{ans} = 18,8$ millions d'années

9.3 La masse totale d'hydrogène qui participe à la fusion est $m = 0,1 \times \mathrm{M}_\odot = 1,99 \times 10^{29}\,\mathrm{kg}$

L'énergie totale disponible est $E = R \times m = 1,228 \times 10^{44}\,\mathrm{J}$

Le Soleil peut briller pendant un temps $\Delta t = \dfrac{E}{1\,\mathrm{L}_\odot} = 3,206 \times 10^{17}\,\mathrm{s} = 1,02 \times 10^{10}\,\mathrm{ans} = 10,2$ milliards d'années

9.4 « chaine proton-proton » : réaction globale = $4\,{}^1\mathrm{H} \;\rightarrow\; {}^4\mathrm{He}$

$m_\mathrm{av} = 4 \times 1,000000\,m_\mathrm{p} = 4\,m_\mathrm{p}$

$m_\mathrm{ap} = 3,972600\,m_\mathrm{p}$

$R = \left(\dfrac{m_\mathrm{av} - m_\mathrm{ap}}{m_\mathrm{av}}\right) c^2 = \left(\dfrac{4\,m_\mathrm{p} - 3,972600\,m_\mathrm{p}}{4\,m_\mathrm{p}}\right) \times \left(3 \times 10^8\right)^2 = 6,17 \times 10^{14}\,\mathrm{J/kg}$

9.5 **(a)** Exothermique

(b) « processus triple alpha » : réaction globale = $3\,{}^4\mathrm{He} \;\rightarrow\; {}^{12}\mathrm{C}$

$m_\mathrm{av} = 3 \times 3,972600\,m_\mathrm{p} = 11,9178\,m_\mathrm{p}$

$m_\mathrm{ap} = 11,910048\,m_\mathrm{p}$

$R = \left(\dfrac{m_\mathrm{av} - m_\mathrm{ap}}{m_\mathrm{av}}\right) c^2 = \left(\dfrac{11,9178\,m_\mathrm{p} - 11,910048\,m_\mathrm{p}}{11,9178\,m_\mathrm{p}}\right) \times \left(3 \times 10^8\right)^2 = 5,85 \times 10^{13}\,\mathrm{J/kg}$

(c) $m_\mathrm{helium} = 0,27 \times (1,99 \times 10^{30}) = 5,373 \times 10^{29}\,\mathrm{kg}$

$E = R \times m_\mathrm{helium} = 5,85 \times 10^{13} \times 5,373 \times 10^{29} = 3,14 \times 10^{43}\,\mathrm{J}$

(d) $\Delta t = \dfrac{E}{\mathrm{L}_\odot} = \dfrac{3,14 \times 10^{43}}{3,83 \times 10^{26}} = 8,20 \times 10^{16}\,\mathrm{s} = 2,49$ milliards d'années

9.6 réaction globale = $2\,{}^{16}\mathrm{O} \;\rightarrow\; {}^{28}\mathrm{Si} \;+\; {}^4\mathrm{He}$

$m_\mathrm{av} = 2 \times 15,875008\,m_\mathrm{p} = 31,750016\,m_\mathrm{p}$

$m_\mathrm{ap} = 27,767208\,m_\mathrm{p} + 3,972600\,m_\mathrm{p} = 31,739808\,m_\mathrm{p}$

$R = \left(\dfrac{m_\mathrm{av} - m_\mathrm{ap}}{m_\mathrm{av}}\right) c^2 = \left(\dfrac{31,750016\,m_\mathrm{p} - 31,739808\,m_\mathrm{p}}{31,750016\,m_\mathrm{p}}\right) \times \left(3 \times 10^8\right)^2 = 2,89 \times 10^{13}\,\mathrm{J/kg}$

9.7 $E = mc^2 = 0,75 \times (3 \times 10^8)^2 = 6,75 \times 10^{16}\,\mathrm{J}$, donc $\dfrac{6,75 \times 10^{16}}{34 \times 10^6} = 1,99 \times 10^9$ fois plus d'énergie.

9.8 Production annuelle de LG-2 : $E = P\Delta t = (5,6 \times 10^9) \times (365,25 \times 24 \times 3\,600) = 1,767 \times 10^{17}$ J

$E = mc^2 \quad \Rightarrow \quad m = \dfrac{E}{c^2} = \dfrac{1,767 \times 10^{17}}{(3 \times 10^8)^2} = 1,96\,\text{kg}$

9.9 $\mathrm{d}m = \rho\,\mathrm{d}V$ avec $\mathrm{d}V = 4\pi r^2 \mathrm{d}r$

$\rho = \dfrac{M}{V} = \dfrac{M}{\frac{4\pi R^3}{3}} = \dfrac{3M}{4\pi R^3}$

$M_{\text{int}} = \rho\left(\dfrac{4\pi r^3}{3}\right)$

Exprimez d'abord toutes les variables de l'intégrale en fonction de r, puis intégrez de $r = 0$ à $r = R$.