

## DURÉE TROIS HEURES - SANS DOCUMENTS

## CALCULATRICE ET PAGE DE NOTES A4 RECTO-VERSO AUTORISEES

Toutes les données numériques nécessaires sont portées dans la table ci-dessous. Elle peuvent être utilisées à la demande selon les besoins de tel ou tel exercice.

Les trois exercices sont totalement indépendants. A l'intérieur d'un exercice donné, les questions sont souvent très largement indépendantes. Il est conseillé de parcourir l'ensemble du sujet avant de démarrer.

La figure (diagramme HR) est à rendre avec la copie. Un barème approximatif est indiqué pour chaque exercice.

La présentation sera noté sur 1 point.

$\pi$	=	3.1415926		$T_{\odot}$	=	6000 K	T surface soleil
$\sigma_S$	=	$5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$	Stefan	$1 R_{\odot}$	=	$7 \cdot 10^8 \text{ m}$	Rayon Solaire
$k$	=	$1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$	Boltzman	$1 M_{\odot}$	=	$2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$	Masse solaire
$h$	=	$6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$	Planck	$1 L_{\odot}$	=	$3.86 \cdot 10^{26} \text{ W}$	Luminosité Solaire
$e$	=	$1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	charge de l'électron	$1 \text{ AU}$	=	$150 \cdot 10^6 \text{ km}$	Unité Astronomique
$c$	=	$3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$	vitesse lumière (vide)	$1 \text{ pc}$	=	$3.1 \cdot 10^{16} \text{ m}$	parsec
$\epsilon_o$	=	$8.84 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$	Permittivité du vide	$1 \text{ AL}$	=	$9.5 \cdot 10^{15} \text{ m}$	Année Lumière
$G$	=	$6.7 \cdot 10^{-11} \text{ J.m.kg}^{-2}$	Constante gravitation	$1 \text{ an (moyen)}$	=	$3.16 \cdot 10^7 \text{ s}$	année moyenne
$a$	=	$7.56 \cdot 10^{-16} \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-4}$	2e constante de Stefan	$H_o$	=	$60 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$	Constante Hubble
$m_H$	=	$1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	masse du proton	$H_o^{-1}$	=	14 milliards d'années	Temps de Hubble

## 1- Cosmologie [7]

Plusieurs quasar (QSO) de redshift  $> 6$  ont maintenant été découverts, notamment lors de grands relevés effectués au télescope Franco-Canadien CFHT (Willott et al., 2007, AJ 134, 2435). Le quasar CFHQS J2329-0301 a un redshift  $z = 6.43$ .

1.1 En se plaçant dans le cadre d'un modèle Einstein-de Sitter, calculer l'âge de l'univers  $t_e$  à l'époque de l'émission des photons du QSO.

1.2 Si on suppose que le facteur d'expansion de l'univers actuel est  $a_o = 1$ , calculer le facteur d'expansion  $a_e$  à l'époque de l'émission des photons reçus de CFHQS J2329-0301.

1.3 Calculer de même la température du corps noir cosmologique  $T_e$  à l'époque  $t_e$ .

1.4 Si on suppose que la masse volumique actuelle est  $\rho_o = 1 \text{ proton/m}^3$ , calculer la masse volumique  $\rho_e$  à l'époque de l'émission

On rappelle l'expression de 3 distances utilisables pour déterminer l'éloignement d'un objet :

$$\begin{aligned} \text{Distance lumineuse } D_L &= \frac{a_o^2}{a_e} r \\ \text{Distance angulaire } D_A &= a_e r \\ \text{Distance de vol } D_V &= c(t_o - t_e) \end{aligned}$$

- 1.5 Exprimer chacune de ces distances en fonction du redshift  $z$  et de la longueur de Hubble  $L_H = c/H_o$ .
- 1.6 Calculer la valeur de chacune de ces distances pour le QSO de redshift  $z = 6.43$ . Quelle est la plus élevée ?
- 1.7 Le QSO CFHQS J1641+3755 a un redshift  $z' = 6.04$ . Calculer son écart de distance lumineuse par rapport au QSO le plus lointain ( $z = 6.43$ ).

## 2- Formation stellaire : effet de la température [12]

On considère un nuage d'hydrogène moléculaire (H2) sphérique de rayon  $R$ , de température  $T$ , et de masse volumique  $\rho$ , et on cherche dans quelles conditions et selon quelle évolution il peut s'effondrer sur lui-même pour former une étoile. On néglige tout autre effet qui pourrait empêcher la contraction (rotation, champ magnétique, etc.).

- 2.1 Rappelez brièvement pourquoi une température élevée tend à empêcher le nuage de s'effondrer.
- 2.2 Donnez une estimation de la valeur de la masse  $m$  des 'particules' (molécules H2) dans le nuage. Donner l'expression de  $\rho$  en fonction de  $n$ , nombre de particule par unité de volume.
- 2.3 En supposant que le nuage est à l'équilibre thermique (équipartition), montrer que la vitesse d'agitation  $v$  des molécules de gaz est proportionnelle à  $\sqrt{T}$ .
- 2.4 Montrer que  $v$  est de l'ordre de  $1 \text{ km.s}^{-1}$  si  $T \approx 40K$ .
- 2.5 En considérant une particule à la périphérie du nuage, calculer, à partir de son bilan énergétique, la taille  $R_o$  à partir de laquelle le nuage s'effondrera, en fonction de  $n$  et  $T$ . Montrer que  $R_o$  s'exprime en parsec comme :

$$R_o(\text{pc}) \approx 2600 \sqrt{\frac{T_K}{n \text{ m}^{-3}}}$$

On considère un nuage de taille  $R = 0.05 \text{ pc}$ , de température  $T = 100 \text{ K}$ , avec  $10^6$  particules par  $\text{cm}^3$ .

- 2.6 Ce nuage est-il stable ou instable ? Evaluer la luminosité  $L$  du nuage en train de s'effondrer et placer le point représentatif de cet objet (supposé rayonner comme un corps noir) dans le diagramme HR.
- 2.7 Expliquer pourquoi l'effondrement du nuage augmente son énergie interne.

Cette augmentation d'énergie amène la température interne à augmenter, et la température en surface augmentera également (dans de moindres proportions). C'est la température de surface dont on suit l'évolution dans la suite de l'exercice car elle est liée à la luminosité (observable) de l'objet. Par la suite, on étudie l'évolution de la contraction du nuage avec un certain nombre d'approximations. Pendant la contraction du nuage, on considère qu'il continue à rayonner comme un corps noir. Le rayon  $R$  et la température  $T$  varient et on étudie l'évolution de sa luminosité  $L$ .

**Phase 1** Dans un premier temps, le nuage n'est pas très dense et toute l'énergie gagnée par l'effondrement est intégralement rayonnée, c'est la phase de *contraction isotherme* : le nuage se contracte en restant à température  $T$  constante.

- 2.8 Indiquer dans le diagramme HR le tracé évolutif du nuage pendant la phase de contraction isotherme. On

considère que cette phase dure jusqu'à ce que  $R$  ait atteint 1% de sa valeur initiale. Estimer  $L$  à la fin de la phase isotherme.

2.9 Expliquer pourquoi la phase isotherme ne peut pas durer indéfiniment. On considère que la durée de cette phase est celle de la chute libre d'une particule depuis le bord  $R$  jusqu'au centre. A partir de l'expression de l'accélération de la pesanteur à la périphérie du nuage, montrer que le temps de chute libre s'exprime comme :

$$\tau \propto \frac{1}{\sqrt{n}}$$

**Phase 2** Lorsque le nuage devient trop opaque pour que l'énergie puisse être évacuée efficacement, il poursuit son effondrement mais  $R$  diminue plus lentement et  $T$  augmente. Cette phase est mal connue et on suppose qu'elle s'achève lorsque le nuage s'est contracté jusqu'à  $100 R_{\odot}$ , pour une température de surface de 1000 K.

2.10 Tracer cette nouvelle portion du chemin d'évolution dans le diagramme HR.

**Phase 3** On considère maintenant le nuage quasiment comme une étoile, même si les réactions nucléaires ne se sont pas encore amorcées au centre. Il termine sa contraction et  $T$  continue à augmenter.

2.11 En exprimant la pression  $P$  dans le nuage soit comme une densité d'énergie gravitationnelle, soit comme le rapport de la force d'attraction gravitationnelle à la périphérie sur la surface de la sphère de rayon  $R$ , montrer que :

$$P \propto \frac{GM^2}{R^4}$$

2.12 En reliant alors la température et la pression par la loi des gaz parfaits, et en remarquant que la masse  $M$  est une constante du problème, montrer que  $T \propto R^{-1}$ .

2.13 En déduire l'expression de la variation  $L(T)$ .  $L$  augmente-t-elle ou diminue-t-elle ? Porter cette nouvelle portion du tracé évolutif sur le diagramme HR.

2.14 Où s'arrête l'évolution de la proto-étoile ? Indiquer ce point d'arrêt sur le diagramme HR. Quel processus physique démarre alors et pour combien de temps ? Pourquoi l'étoile cesse-t-elle d'évoluer ?

2.15 Estimer la luminosité de l'étoile sur la séquence principale. Si on suppose que  $L \propto M^3$ , en déduire une estimation de la masse de l'étoile formée.

2.16 Comparer avec la masse du nuage initial. Conclusion.

**Cas de la dissociation de l'hydrogène moléculaire** A un certain moment pendant la phase 2, la température augmente suffisamment pour casser toutes les liaisons des molécules  $H_2$ . L'énergie consommée par molécule dissociée est de 4.5 eV.

2.17 Discuter brièvement de l'effet de cette dissociation sur le comportement de l'étoile en train de se former (proto-étoile). Calculer l'énergie totale nécessaire pour dissocier l'ensemble des molécules présentes dans le nuage. Si cette énergie est fournie par la luminosité  $L \approx 10 L_{\odot}$  de l'objet, calculer le temps nécessaire pour cette dissociation. Conclusion.

2.18 Quel autre processus consommateur d'énergie aura encore lieu au sein de l'étoile avant sa période de vie sur la séquence principale ? Durant laquelle des 3 phases ?

Figure à rendre avec la copie

No de place / carte étudiant : \_\_\_\_\_

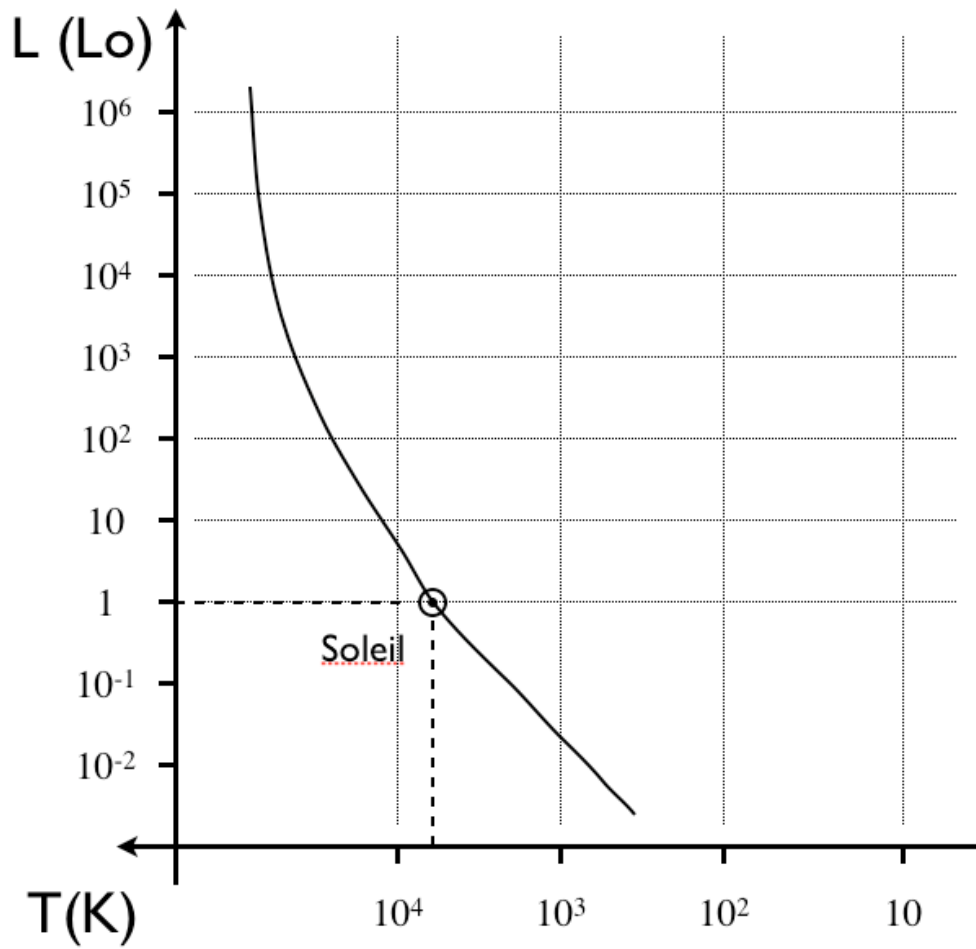


Figure 1: Diagramme HR en échelle log-log