

## SEPTIÈME TD

5 mai 2020

### I - Sphère de Strömgen

On considère un nuage homogène constitué exclusivement d'hydrogène atomique neutre HI, de densité  $n_H$  (nombre d'atomes par unité de volume) et de température  $T$ . Pour les applications, on prendra  $n_H = 50 \text{ cm}^{-3}$  et  $T = 50 \text{ K}$ .

1. Rappeler l'expression des niveaux d'énergie  $E_n$  de l'électron dans un atome d'hydrogène, ainsi que leur dégénérescence  $g_n$ , où  $n > 0$  est le nombre quantique principal. On rappelle que chaque état électronique orbital est caractérisé par un triplet d'entiers  $(n, l, m)$  et correspond à deux états de spin électronique. On notera

$$E_0 = \frac{m_e e^4}{8h^2 \epsilon_0^2} = kT_0$$

l'énergie d'ionisation de HI à partir du niveau fondamental  $n = 1$ , et on en donnera la valeur numérique, ainsi que celle de  $T_0$ . Que peut-on dire des populations des différents niveaux dans ce nuage HI? On pourra notamment calculer le rapport  $n_2/n_1$  des populations du premier niveau excité et du fondamental.

2. En présence de photons suffisamment énergétiques, l'hydrogène peut-être ionisé selon la réaction  $\text{H} + h\nu \rightarrow \text{H}^+ + e^-$ . L'hydrogène ionisé est noté HII. Déterminer la longueur d'onde critique  $\lambda_{\text{Ly}}$  (pour Lyman) permettant cette ionisation. La comparer à la longueur d'onde caractéristique du rayonnement issu d'une étoile de type O5 ( $T_* = 44500 \text{ K}$ ), O9 ( $T_* = 33000 \text{ K}$ ) et B7 ( $T_* = 13000 \text{ K}$ ). On rappelle la loi du déplacement de Wien pour une émission de corps noir :  $\lambda_{\text{max}} T = 2900 \mu\text{m K}$ .

3. On considère qu'à l'instant  $t = 0$ , une étoile de température  $T_*$ , de rayon  $R_*$  et de luminosité bolométrique  $L_*$  s'allume au sein du nuage HI. On rappelle que  $L_*$  est la puissance lumineuse (exprimée donc en W) intégrée sur tout le spectre. Exprimer le nombre  $N_\nu$  de photons émis par intervalle de fréquence et par unité de temps, en fonction de  $L_*$ ,  $h$ ,  $\nu$  et  $B_\nu(T_*)$ . Montrer que le nombre de photons Lyman ( $\lambda \leq \lambda_{\text{Ly}}$ ) émis par cette étoile par unité de temps s'écrit

$$N_{\text{Ly}} = \frac{15}{k\pi^4} \frac{L_*}{T_0} G\left(\frac{T_0}{T_*}\right) \quad \text{avec} \quad G(x) = x \int_x^\infty \frac{u^2}{e^u - 1} du.$$

On donne l'intégrale suivante, utile pour obtenir la loi de Stefan

$$\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{\pi^4}{15}.$$

Estimer  $N_{Ly}$  pour les trois étoiles de la question précédente, pour lesquelles on donne les luminosités respectives  $L_*(O5) = 7.9 \times 10^5 L_\odot$ ,  $L_*(O9) = 9.7 \times 10^4 L_\odot$  et  $L_*(B7) = 320 L_\odot$ . On donne aussi  $G(3.55) = 2.24$ ,  $G(4.78) = 1.38$  et  $G(12.1) = 0.011$ .

**4.** La section efficace  $\Sigma_a$  d'absorption d'un photon Lyman par un atome d'hydrogène est de l'ordre de  $10^{-17} \text{ cm}^2$ . Estimer le libre parcours moyen  $l_I$  d'un tel photon dans le nuage HI considéré. Combien de temps ce photon survit-il après avoir pénétré la région neutre ?

**5.** Dans la région ionisée, les photons UV ne peuvent subir que des diffusions, avec une section efficace  $\Sigma_s \sim 6.7 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ . Quel est le libre parcours moyen  $l_{II}$  des photons dans cette région ? Sachant que la région HII a un rayon de l'ordre du parsec, que pouvez-vous dire de la probabilité qu'un photon UV y soit diffusé ?

**6.** En l'absence de recombinaison des protons et des électrons, quelle est l'équation régissant l'évolution du rayon  $R_S(t)$  de la région HII autour de l'étoile excitatrice ?

**7.** En réalité, la photoionisation est concurrencée par le processus inverse de recombinaison  $H^+ + e^- \rightarrow H + h\nu$ . On note  $r_c = \alpha n_e n_p$  le taux volumique de recombinaisons, avec  $\alpha = 3 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ ,  $n_p$  et  $n_e$  les densités numériques des protons et des électrons, respectivement. Calculer  $r_c$  ainsi que le temps caractéristique associé. Comparer ce temps aux temps caractéristiques d'évolution stellaire. Conclusion ? Que devient l'équation d'évolution de  $R_S$  ? Donner le rayon d'équilibre en fonction de  $N_{Ly}$ ,  $\alpha$  et  $n_H$  et le calculer numériquement pour les trois étoiles des questions **2.** et **3.**

**8.** Dans un évènement de photoionisation isolé, que devient l'excédent d'énergie apportée par le photon  $\Delta E = h\nu - E_0$  ? Que peut-on en déduire quant à la température de la région HII par rapport à celle du nuage HI environnant ? Qu'en est-il de la pression ?

**9.** À quoi peut-on attribuer la belle couleur rouge émise par les régions HII ?