Ecole Doctorale
Examen de Cosmologie - Jeudi 13 mars 2003

2 heures — Document autorisé: cours

Effet Gunn-Peterson

L'hydrogène neutre à un redshift z absorbe fortement la lumière émise par un quasar à la longueur d'onde de la raie Lyman alpha 121.6 nm. Il en résulte une absorption significative visible par un observateur terrestre à la longueur d'onde $121.6(1+z)$. En supposant que la raie Lyman alpha est infiniment fine, la section efficace d'absoption par atome d'hydrogène est:

$$\sigma(\nu) = \sigma_\alpha \, \delta(\nu - \nu_\alpha) \ , \ \sigma_\alpha = \frac{1.}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi e^2}{m_e c} \, f\alpha \tag{1}$$

où ν est une fréquence, $\nu_\alpha = c/121.6$ nm, $f\alpha = 0.416$ est la force d'oscillateur de la raie Lyman alpha et σ_α est en unités cgs. Par la suite, on ne prendra pas en considération des vitesses individuelles qui pourraient affecter les redshifts des absorbeurs.

- Tout d'abord, montrez que compte tenu de la relation entre Ω_m, Ω_k et Ω_Λ, $H(z)$ peut toujours s'ecrire sous la forme

$$H(z) = H_0 E(z) = H_0 \left[(1+z)^3 \Omega_m + (1+z)^2 \Omega_k + \Omega_\Lambda\right]^{1/2} \tag{2}$$

- Calculer la profondeur optique d'absorption à la fréquence observée ν_0 causée par l'hydrogène neutre au redshift $1+z = \nu_\alpha/\nu_0$ en fonction de σ_α, c (célérité de la lumière), ν_α, la densité d'atomes d'hydrogène neutre, n_{HI}, et le paramètre de Hubble $H(z)$. On se place dans une cosmologie standard. Préciser ce que cela signifie et vérifier que dans ce cas la profondeur optique peut s'ecrire sous la forme:

$$\tau_\alpha(\nu_0) = \int n_{HI} \ c \ \sigma_\alpha \ \delta(\nu_0(1+z) - \nu_\alpha) \left|\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}z}\right| \mathrm{d}z \tag{3}$$

  où δ est la distribution de Dirac.

- Montrer alors que:

$$\tau_\alpha = 4.15 \times 10^4 \ h^{-1} \ \mathrm{m}^{-3} \ . \ \frac{n_{HI}}{E(z)} \tag{4}$$

  En supposant que le milieu intergalactique était dominé par l'hydrogène neutre à cette époque comment devrait se manifester qualitativement cette valeur élevée de τ_α dans le spectre des quasars au longueur d'onde plus courtes que la raie Lyman alpha au redshift du quasars?

- La profondeur optique mesurée en fonction de la fréquence n'est pas uniforme, mais elle change selon la valeur de n_{HI} le long de la ligne de visée. Rappelez quelques évidences observationnelles qui confortent cette hypothèse.

- En particulier, la profondeur optique à $z \approx 1$ est de l'ordre de l'unité. En supposant une fraction en masse d'hélium neutre $Y = 0.24$, et une constante de Hubble, une fraction de baryons et une constante cosmologique telles qu'elles sont déterminées avec les données du satellite WMAP et des interféromètres ACBAR et CBI, montrez que la densité d'hydrogène neutre peut s'écrire:

$$n_{HI} = (1 - x_e)\ (1 - Y)\ (\Omega_B\ h^2)(1+z)^3 \frac{3(H_0/h)^2}{8\pi G m_H} \tag{5}$$

  où x_e est la fraction d'hydrogène ionisé, m_H la masse de l'atome d'hydrogène, Ω_B est le paramètre de densité de baryon. En utilisant cette expression dans τ_α quelle fraction d'atomes d'hydrogène neutre $(1 - x_e)$ déduisez vous à $z = 3$? Que pouvez vous conclure sur le milieu intergalactique à cette époque?

- A l'équilibre, les atomes d'hydrogène sont photoionisés et se recombinent à un taux identique impliquant l'équilibre suivant

$$n_{HI}\beta = n_e n_p \alpha(T) \tag{6}$$

  soit

$$\frac{1 - x_e}{x_e^2} = \frac{n_H \alpha(T)}{\beta} \tag{7}$$

  où $n_H = (1 - Y)\rho_B / m_H$ et

$$\beta = \int_{\nu_L}^{\infty} 4\pi J_\nu\ \sigma_i(\nu)\ \frac{\mathrm{d}\nu}{h\nu}\ \approx\ 3 \times 10^{-12}\ J_{-21}\ \mathrm{s}^{-1}; \tag{8}$$

  où $\alpha(T) = 2.06 \times 10^{-11} T^{-1/2} \phi_2(T)\ \mathrm{cm^3 s^{-1}}$, $\phi_2(T) = 0.448\ \ln(1 + h\nu_L/kT)$.

  Dans notre cas $h\nu_L = 13.6$ eV, σ_i est la section efficace d'ionisation, T est la température en kelvin, et J_{-21} est l'intensité moyenne aux fréquences juste au-dessus de ν_L (en 10^{-21} erg.cm^{-2}s^{-1}.Hz^{-1} ster^{-1}). Le terme $\alpha(T)$ exclut les recombinaisons directes vers l'état fondamental.

  En supposant que la température du gaz est de 10^4 K, pour un univers déterminé avec WMAP+ACBAR+CBI, quelle est la valeur nécessaire pour J_{-21} pour ioniser le gaz au niveau déterminé à la question précédente (attention: il est préférable de travailler en cgs pour cette dernière question)?

- On peut prédire J_{-21} en construisant des modèles d'ionisation du milieu intergalactique. Pourriez vous expliquer qualitativement quelles pourraient être les sources ionisantes que l'on pourrait introduire dans ces scénarios?

On done $(4\pi\epsilon_0)^{-1} = 9. \times 10^9$ MKS, $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$kg, $e = 1.602 \times 10^{-19}$ Coulomb, $m_H = 1.67 \times 10^{-27}$ kg, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ JK^{-1}, $c = 3 \times 10^8$ ms^{-1}. On prendra $H_0^{-1} = 9.8 \times 10^9\ h_{100}^{-1}$ ans (dans le texte $h = h_{100}$).