

Introducción a la Cosmología

Guía 4: *Nucleosíntesis*

Problema 1: Si los neutrinos electrónicos interactúan con protones y neutrones a temperaturas por encima de los 0.8 MeV (freeze-out de los neutrones), ¿por qué decimos que están desacoplados a temperaturas por debajo de los 1.5 MeV?

Problema 2: Encuentre la relación entre temperatura y tiempo durante la era dominada por la radiación, antes y después de la aniquilación electrón-positrón, en función del número de especies de neutrinos.

Problema 3: Teniendo en cuenta que el deuterio tiene spin 1, obtenga la siguiente expresión para su concentración en masa en equilibrio:

$$X_D = 5.67 \times 10^{-14} \eta_{10} T_{MeV}^{3/2} e^{B_D/T} X_p X_n,$$

donde $\eta_{10} = 10^{10} \times n_N/n_\gamma$, n_N es la densidad numérica de nucleones, $B_D = 2.23$ MeV es la energía de ligadura del deuterio y X_p y X_n son las concentraciones de protones y neutrones libres respectivamente. Verifique que X_D se hace de orden 1 a temperaturas cercanas a los 0.06 MeV. Obtenga también la concentración en equilibrio del helio-4, cuyo spin es 0 y cuya energía de ligadura es 28.3 MeV, y verifique que se hace de orden 1 a temperaturas cercanas a los 0.3 MeV. Usando estos resultados, explique qué es el cuello de botella del deuterio.

Problema 4: Discuta cómo cambiaría la producción de helio-4 durante la nucleosíntesis primordial si una de las siguientes cantidades fuera mayor de lo que es: (a) la densidad de bariones; (b) la constante de acoplamiento de las interacciones débiles; (c) la constante de Newton; (d) la temperatura actual de la radiación cósmica de fondo.

Problema 5: La figura a continuación muestra la concentración de neutrones libres en el universo en función de la temperatura y para distintos números de especies de neutrinos (fuente: Peebles, P.J.E., *Principles of physical cosmology*, Princeton University Press, 1993). (a) ¿Por qué esta concentración tiene cambios en la pendiente? ¿A qué procesos corresponden? (b) ¿Por qué afecta el número de familias de neutrinos a la concentración de neutrones libres? (c) ¿A qué temperatura comienza a crecer apreciablemente la concentración de deuterio? Comparar esta temperatura con la energía de ligadura.

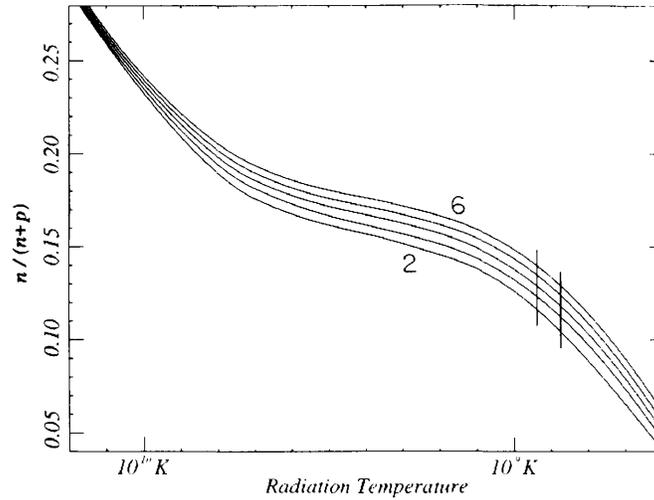


Figure 6.10. Neutron abundance as a function of radiation temperature. The parameter is the effective number N_ν of neutrino families in equation (6.174). The vertical lines mark the critical temperature where deuterium can accumulate and burn to helium, for baryon density parameters $\Omega_b h^2 = 1$ and 0.013.

Problema 6: Sabiendo que la concentración de freeze-out de los neutrones es $X_n^* \simeq 0.158 + 0.005(N_\nu - 3)$, donde N_ν es el número de especies de neutrinos, que la vida media de un neutrón libre es $\tau_n \simeq 886$ s, que $\eta_{10} \simeq 6$ y que la nucleosíntesis primordial empieza cuando la concentración en masa del deuterio es $X_D \simeq 10^{-2}$, obtenga la concentración en masa del helio-4 al final de la nucleosíntesis en función de N_ν .