

# COSMOLOGÍA - 1er cuatrimestre 2019

Prof. Esteban Calzetta

Departamento de Física, FCEyN, UBA

## Guía 3: Big Bang Nucleosíntesis

### Núcleos primordiales

1. Teniendo en cuenta que el Deuterio tiene spin 1, obtenga la siguiente expresión para su concentración en masa en equilibrio:

$$X_D = 5.67 \times 10^{-14} \eta_{10} T_{\text{MeV}}^{3/2} e^{B_D/T} X_p X_n, \quad (1)$$

donde  $\eta_{10} = 10^{10} \times n_b/n_\gamma$ ,  $n_b$  es la densidad numérica de bariones,  $B_D = 2.23$  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 para  $\eta_{10} \sim O(1)$ . 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.

**Ayuda.** Recuerde que  $X_p = n_p/n_b$  y  $X_n = n_n/n_b$  son las concentraciones de protones y neutrones libres respecto de la cantidad de nucleones, o bariones, totales incluyendo aquellos ligados en núcleos. Recuerde también que la formación de Deuterio se da luego del *freeze-out* de los neutrones.

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.
3. Considere la siguiente reacción en el universo



¿Qué fracción de neutrones se transforma en Deuterio cuando el universo tiene 5 minutos de vida? Use que  $\Omega_b h^2 = 0.02$  y que los bariones consisten en 14% neutrones y 86% protones.

4. 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?
5. Decida si la abundancia de Helio-4 debería ser más grande o más pequeña, respecto al cálculo standard conocido, si
  - (a) se suma una familia extra de neutrinos al universo
  - (b) las interacciones débiles son más fuertes, de modo que la distribución de equilibrio térmico entre neutrones y protones se mantiene hasta que  $k_B T = 0.25$  MeV
  - (c) el tiempo de decaimiento del neutrón fuera menor
  - (d) la diferencia de masa proton-neutron es más grande

- (e) la densidad de bariones fuera mayor
  - (f) la constante de Newton fuera mayor
  - (g) la temperatura actual de la radiación cósmica de fondo fuera mayor.
6. Sabiendo que la concentración de freeze-out de los neutrones es  $X_n^* \simeq 0.158 + 0.005(N_\nu - 3)$ , donde  $N_\nu$  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  $N_\nu$ .

### Un poco de números

7. Utilizando el program AlterBBN responda las siguientes preguntas:
- (a) Compare gráfica y numéricamente la diferencia en las abundancias de los núcleos de los elementos ligeros producidas en los casos  $\Omega_\Lambda = 0$  y  $\Omega_\Lambda = 0.7$
  - (b) ¿Cómo varían estas abundancias en caso de variar el número de especies de neutrinos?  
¿Cuál de los núcleos livianos es más sensible a estos cambios?
  - (c) Entre los parámetros a modificar está la vida media del neutrón. Modifique este valor y señale las diferencias notorias en las abundancias resultantes. Justifique.
  - (d) Notará que entre los núcleos producidos no hay ninguno con 5 nucleones. Dé argumentos que justifiquen este hecho.

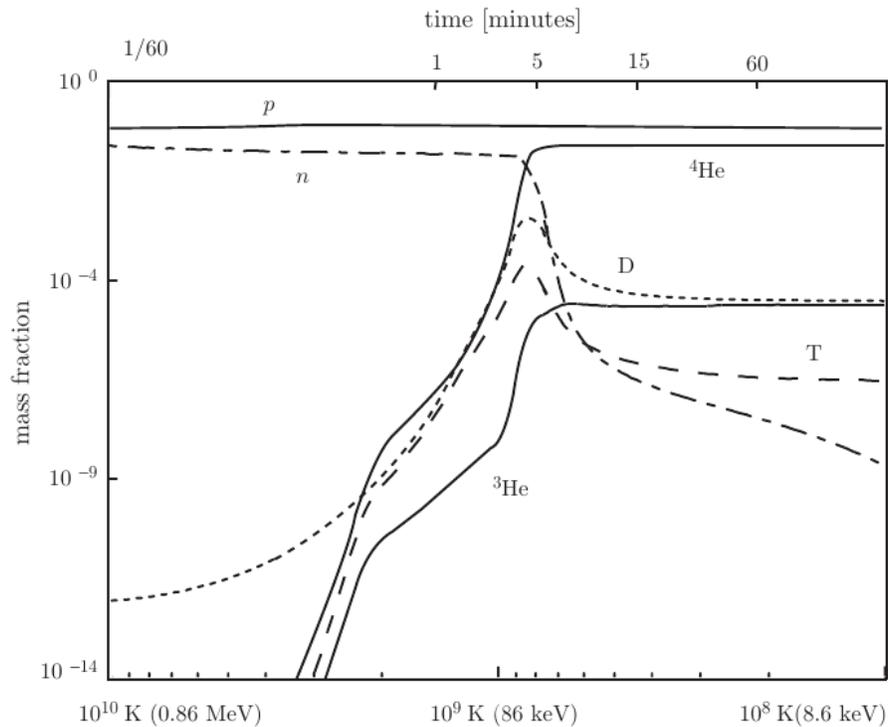


Figure 1: Fracción de masa de los neutrones libres, protones libres y núcleos livianos primordiales en función de la temperatura.

- (e) Grafique las abundancias de los distintos núcleos livianos en función de  $\eta_{10}$  para un rango  $10^{-1} < \eta_{10} < 10^2$ . ¿Puede ahora profundizar o repensar su respuesta del punto 5e?
- (f) A partir de los resultados del código grafique la fracción de masa de los núcleos primordiales más relevantes en función de la temperatura, o tiempo, para distintos valores del número efectivo de especies de neutrinos y del tiempo de decaimiento del neutrón.

En la figura 1 se muestra la fracción de masa de protones libres, neutrones libres y núcleos livianos primordiales en el universo en función de la temperatura (fuente: V. Mukhanov, *Physical Foundations of Cosmology*, Cambridge University Press, 2005) ¿Obtiene algo similar en sus cálculos?

- i. ¿Por qué la concentración de neutrones disminuye abruptamente? ¿Por qué decrece indefinidamente?
- ii. Explique nuevamente qué es el cuello de botella del deuterio
- iii. Compare la temperatura a la cual estos núcleos tienen una fracción de masa apreciable y compare con la energía de ligadura de cada uno. ¿Deberían ser iguales ambas escalas de energía? Explique

En todos los casos en los que se justifique, muestre los gráficos apropiados y no se olvide de señalar los parámetros del modelo y los parámetros de cálculo que empleó.