



Aula 9 – Nucleossíntese e o Universo jovem

**C.A.Wuensche / C. Córdula Dantas
ca.wuensche@inpe.br
INPE – Divisão de Astrofísica**



Introdução

- ☑ Quando a física nuclear, a física de partículas e a cosmologia se encontram
- ☑ $t \sim 10^{-5} s \rightarrow s$; Temperaturas típicas da ordem de 10^{15} K
- ☑ $t \sim 3$ min \rightarrow formação de D, He (nucleossíntese primordial, $E=2.2$ MeV); Temperaturas típicas da ordem de 10^8 K
- ☑ $t \sim 380.000$ anos (1.19×10^{13})s \rightarrow recombinação ($E=13,6$ eV); temperaturas típicas da ordem de 10^3 K

	T(K)	a/a_0	t (sec)
~ 10 MeV	10^{11}	1.9×10^{-11}	0.0108
~ 1 MeV	10^{10}	1.9×10^{-10}	1.103
~ 100 keV	10^9	2.6×10^{-9}	182
~ 10 keV	10^8	2.7×10^{-8}	19200



Nêutrons e prótons

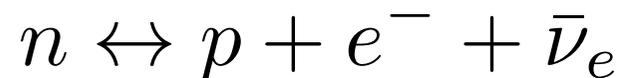
- ☑ Prótons e nêutrons são os bárions mais abundantes no universo hoje. Entretanto, nêutrons só existem porque estão ligados a prótons no núcleo de átomos.
- ☑ Reações de equilíbrio e captura de nêutrons são uma corrida contra o tempo.
- ☑ A expansão do Universo resfria o meio e impede que as reações de equilíbrio se mantenham ('freeze-out')
- ☑ A meia vida do nêutron livre é da ordem de 10 minutos (para ser exato, $\tau = 14.7$ minutos)
- ☑ A nucleossíntese primordial tem que ser mais rápida do que isso.



- ☑ Desacoplamento dos neutrinos, em $t \sim 0.1s$ ($T=3 \times 10^{10}$ K, $E=10$ MeV), vai impedindo a “mão dupla” de diversas reações!
- ☑ O Q_{np} tem energia suficiente para produzir um elétron e um neutrino no decaimento do nêutron

$$Q = m_n - m_p = 1.29 \text{ MeV}$$

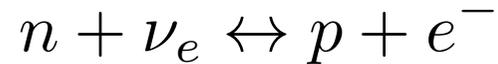
1



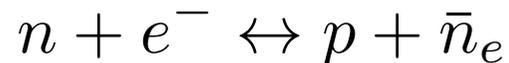
2



- Desacoplamento dos neutrinos, em $t \sim 0.1s$ ($T=3 \times 10^{10}$ K, $E=10$ MeV), vai impedindo a “mão dupla” das reações!

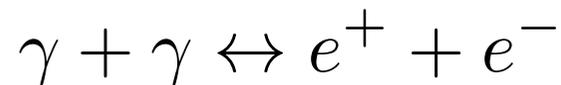


3



4

- Como $E_{e^-}=0.511$ MeV, pouco depois do desacoplamento dos neutrinos a temperatura cai para cerca de 1 MeV e a reação de equilíbrio $e^- e^+$ também é congelada (pósitrons livres desaparecem)



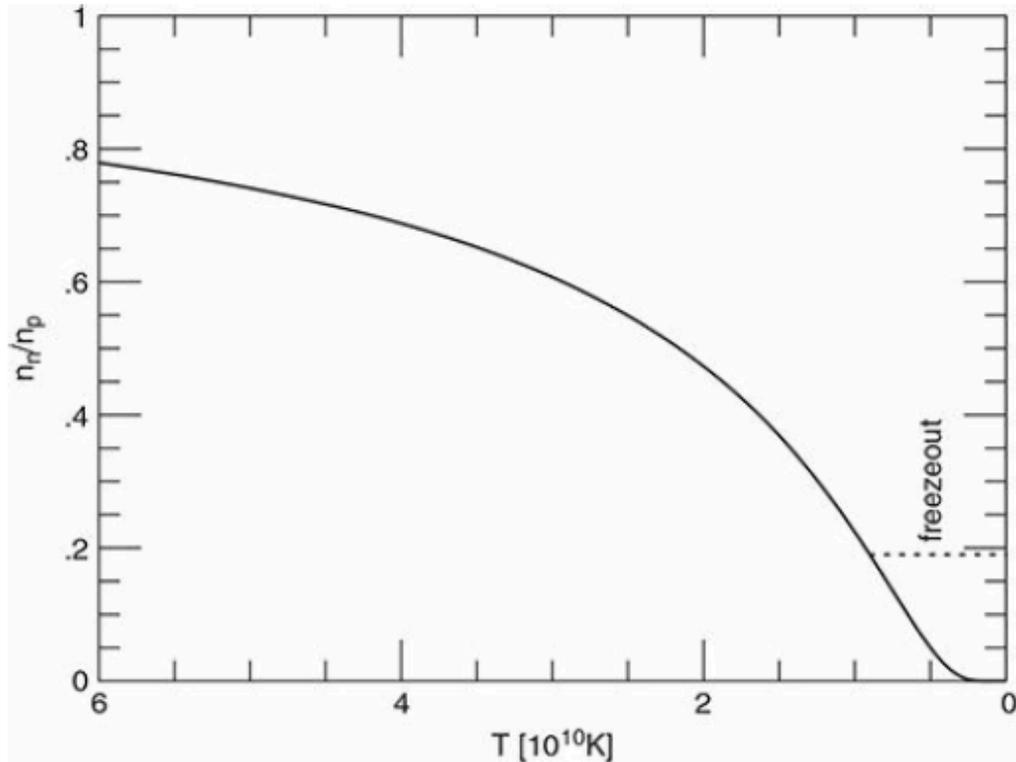
5

- Como a massa de repouso do próton (938,3 MeV) e do nêutron (939,5 MeV) são muito maiores do que kT nessa época ($t \ll 10$ minutos), consideramos que essas espécies estavam em equilíbrio e que somente poderiam se transformar uma na outra conforme as reações acima.



Figure 9.2 Neutron-to-proton ratio in the early universe. The solid line assumes equilibrium; the dotted line gives the value after freezeout. Temperature decreases, and thus time increases, from left to right.

Nêutrons e
prótons



Fonte: Introduction to Cosmology (B. Ryden)

$$n_n = g_n \left(\frac{m_n kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_n c^2}{kT}\right) \quad \boxed{6}$$

$$n_p = g_p \left(\frac{m_p kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{m_p c^2}{kT}\right) \quad \boxed{7}$$

$$\frac{n_n}{n_p} = \left(\frac{m_n}{m_p} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{(m_n - m_p)c^2}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{Q_n}{kT}\right) \quad \boxed{8}$$

- ☑ “Freeze-out” – congelamento da razão n-p, em função da temperatura disponível impedir a reação 2 e da meia vida do nêutron ser da ordem de 10 minutos
- ☑ $T_{\text{freeze}} = 9 \times 10^9$ K, $t_{\text{freeze}} = 1$ s.
- ☑ Nesse momento a razão p-n congela em 0.2 e, em cerca

$$\frac{n_n}{n_p} = \exp\left(-\frac{Q_n}{kT_{\text{freeze}}}\right) \approx 0.2 \quad \boxed{9}$$



- ☑ A pouca abundância de nêutrons explica a razão observada hoje entre H e He primordial (0.750 para 0.249, aproximadamente).
- ☑ A reação $p + n \rightleftharpoons D + \gamma$. (eq. 10) é muito mais eficiente que p+p, mas a abundância entre as espécies permitiu a produção de muito pouco deutério
- ☑ A nucleossíntese prossegue até que todos os nêutrons estejam capturados ou decaíam segundo a reação 2.

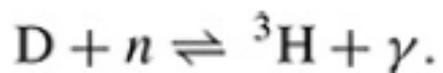
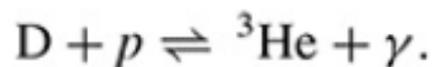


Síntese do Deutério e do ^4He

- ☑ Ambos os processos dependem também da abundância de nêutrons num intervalo de tempo entre 0.1s e 600s.
- ☑ Um livro do Steven Weinberg (Os Três Primeiros Minutos) descreve especialmente bem os detalhes do processo, embora seja um livro de divulgação.



- ☑ A nucleossíntese do deutério ocorre a uma temperatura um pouco menor do que $T = 1 \times 10^9$ K e, enquanto isso, a fração n-p cai para 0.15
- ☑ Essa produção de D e o número de n livres vai limitar a produção de He e Li
- ☑ ${}^4\text{He}$ é muito estável e a maioria dos núcleos de He formados serão de ${}^4\text{He}$



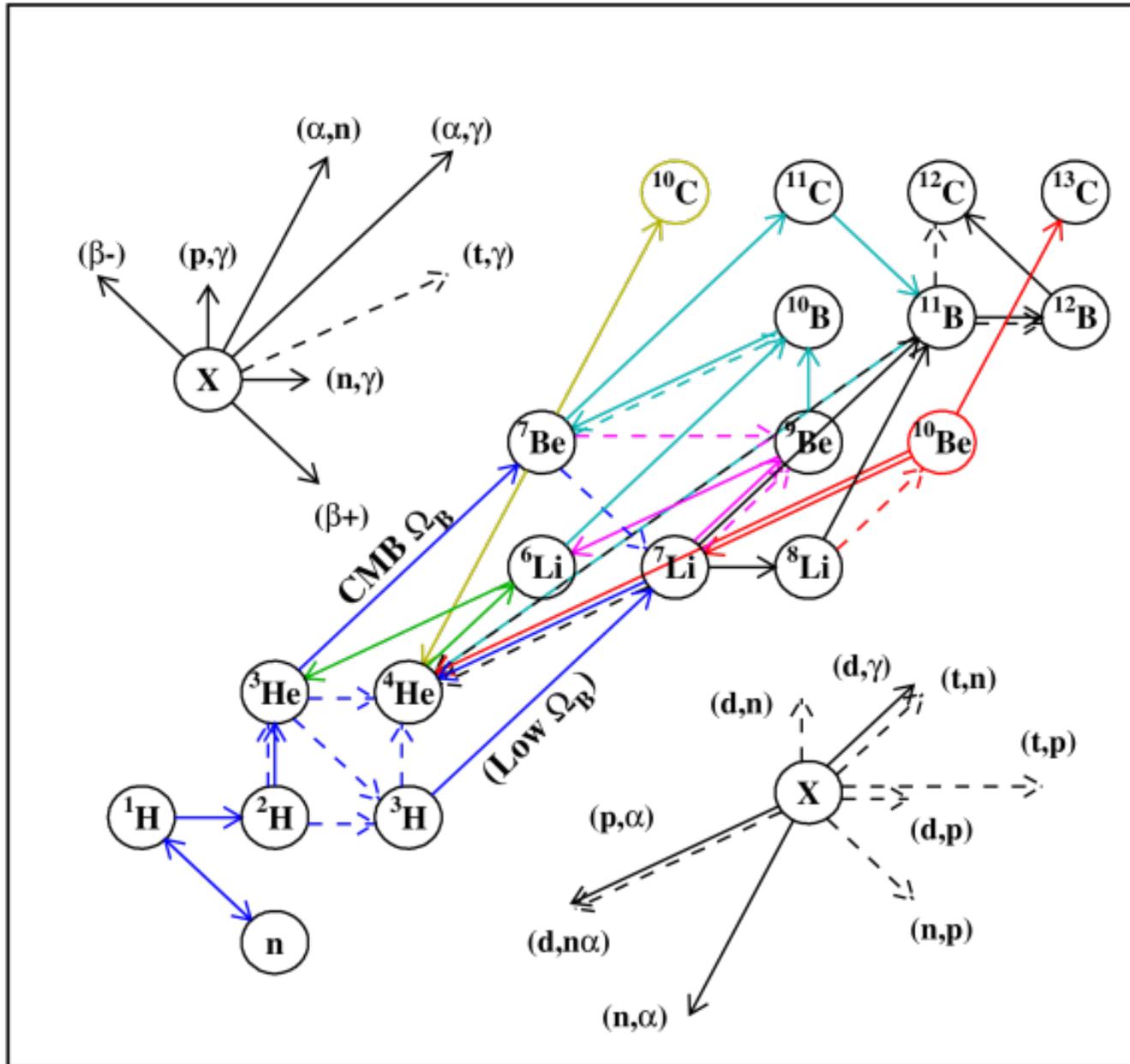
Canal de reação menos favorável, Trítio é instável e decai em ${}^3\text{He}$ por decaimento beta $p \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$



- ☑ Reações possíveis para a formação de ${}^4\text{He}$



- ☑ Existe a limitação natural dos n livres e da quantidade de D produzido. A reação 3, com Trítio, é pouquíssimo eficiente, uma vez que o Trítio é instável
- ☑ A tendência dos canais de reação é chegar no ${}^4\text{He}$ e, com a temperatura caindo, fótons para quebrar o ${}^4\text{He}$ não vão estar disponíveis
- ☑ n livres também vão desaparecendo após o terceiro minuto
- ☑ Reações para elementos mais pesados (Li, Be e B) são “embarreiradas” pela temperatura decrescente, grande estabilidade do ${}^4\text{He}$ e grande instabilidade dos núcleos de Li e Be



Canais de reação possível para BBN, até a produção de CNO. Os esquemas com X e a orientação das setas mostra os caminhos das reações. Em cima: Beta inverso, (p, γ) , (α, n) , (α, γ) , etc... Em baixo: (d, n) , (d, γ) , (t, n) , (t, p) , etc...

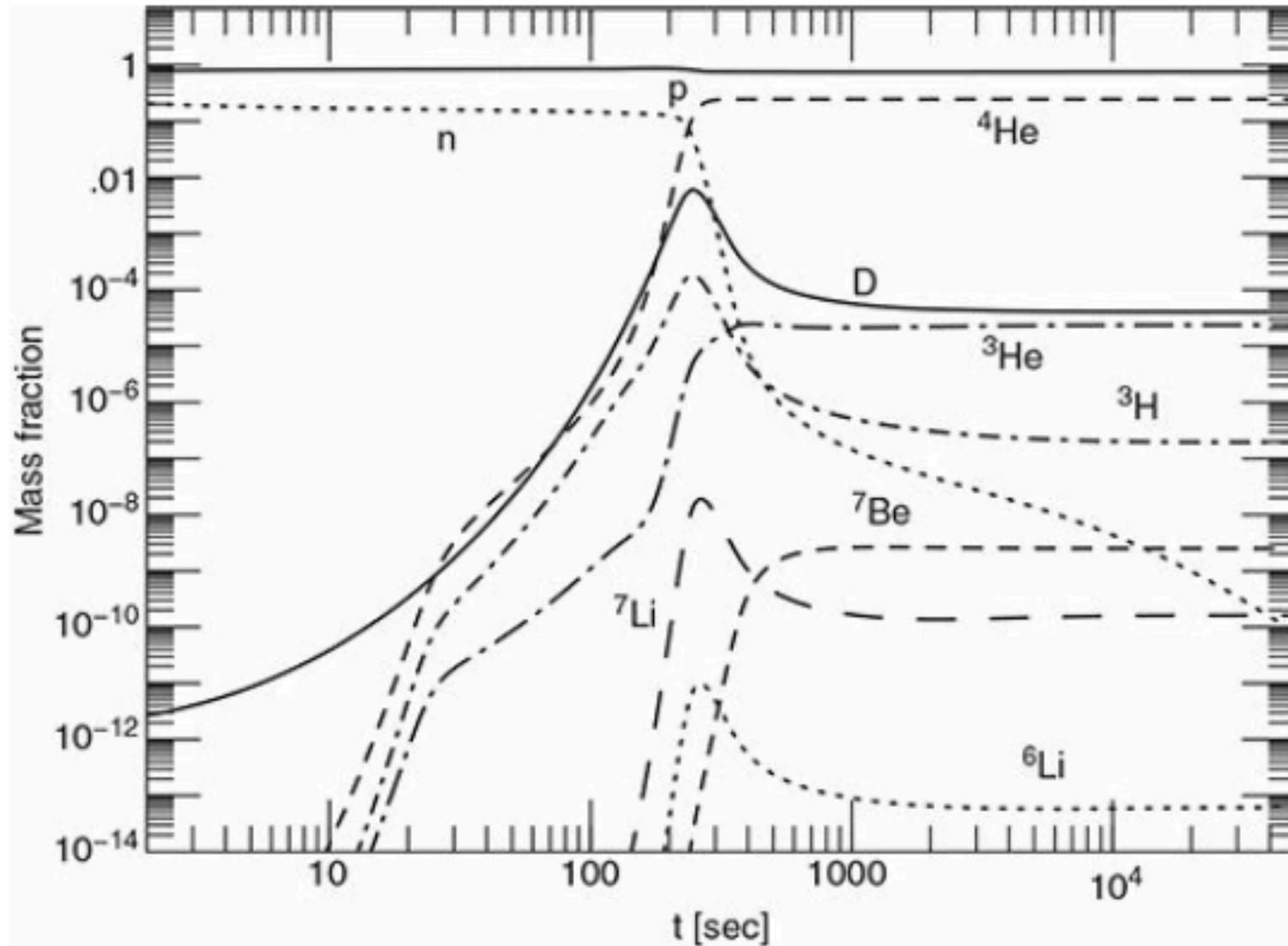


Figure 9.4 Mass fraction of nuclei as a function of time during the epoch of nucleosynthesis. Time increases, and thus temperature decreases, from left to right. [data courtesy of Alain Coc]

Fonte: Introduction to Cosmology (B. Ryden)

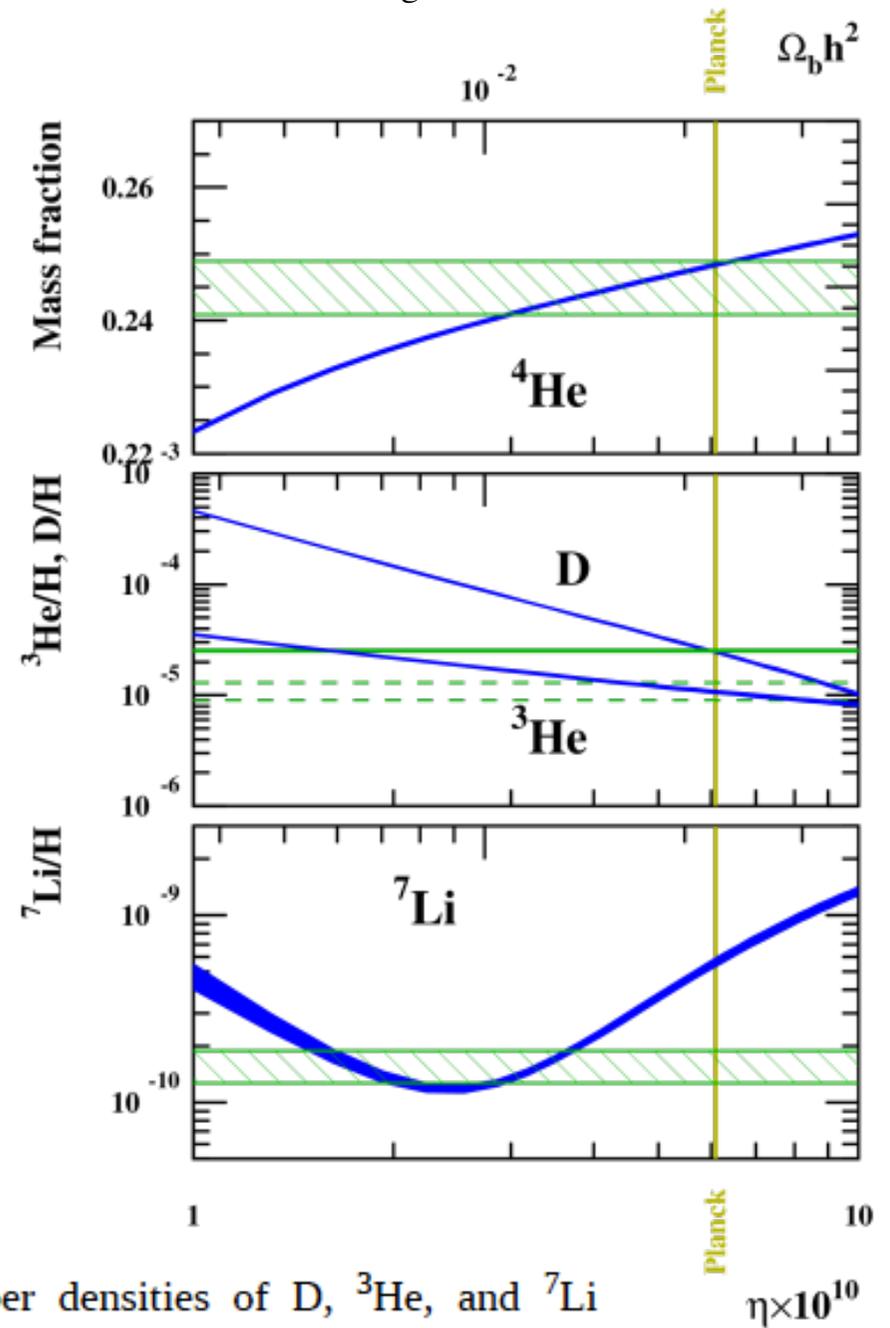
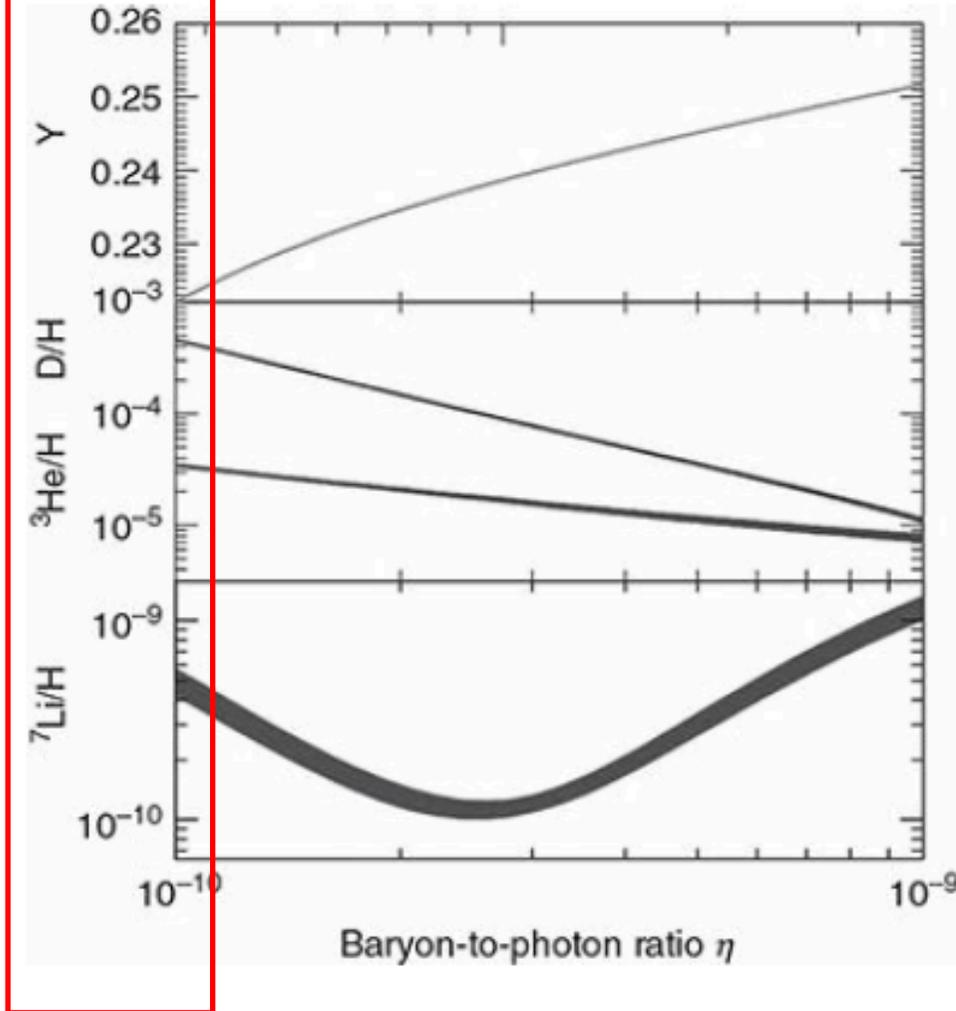
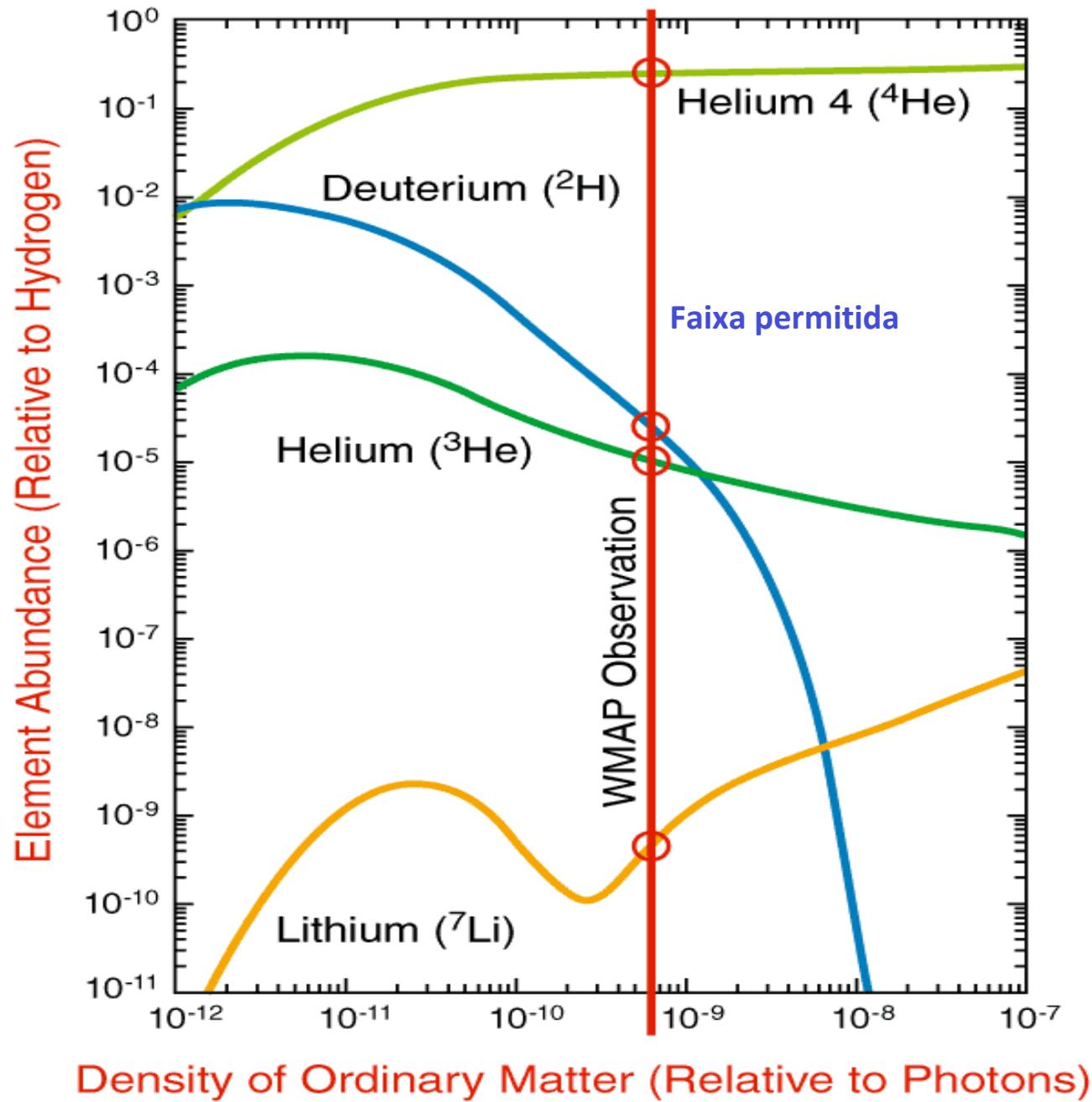


Figure 9.5 The mass fraction of ${}^4\text{He}$, and the number densities of D , ${}^3\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ expressed as a fraction of the H number density. The width of each line represents the 1σ confidence interval in the density. [Cyburt *et al.* 2016, *Rev. Mod. Phys.*, **88**, 015004]

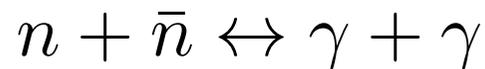
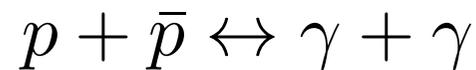
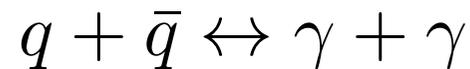


Fonte: wmap.gsfc.nasa.gov



Assimetria bárion-antibárion

- ☑ A nucleossíntese primordial ocorre na época da radiação ($t \ll t_{mr}$)
- ☑ A razão bárion-fóton ($\sim 10^{-10}$) é extremamente pequena, com 10 bilhões de fótons para cada bárion...
- ☑ Mas, no passado, reações de equilíbrio entre quarks e antiquarks, e depois, entre próton/antipróton e nêutron/antinêutron ocorriam, até que a temperatura atingia valores abaixo da temperatura de equilíbrio de uma determinada reação e havia um 'freezeout' daquela reação (ou espécie) específica.





- ☑ Supomos (sem uma razão forte para isso) que no passado também havia uma pequena assimetria entre quarks e antiquarks.
- ☑ Essa assimetria se traduz na razão bárion-fóton ($\sim 10^{-10}$) observada atualmente e na assimetria matéria/antimatéria (essencialmente bárion/antibárion)
- ☑ Entretanto, a razão da assimetria original ainda não é entendida.



Alguns comentários finais

- ☑ Os resultados da nucleossíntese primordial são extremamente robustos, se comparados com as observações, exceto pela produção de Li
- ☑ Um artigo interessante sobre essa discrepância do Li é “The Cosmological Lithium Problem Revisited” (C. Bertulani, A.M. Mukhamedzhanov e Shubhchintak, arXiv:160303864)

	BBN	Observation
^4He	$0.2485 (+ 0.001 - 0.002)$	0.256 ± 0.006
D/H	$2.692 (+ 1.77 - 0.07) \times 10^{-5}$	$(2.82 \pm 0.26) \times 10^{-5}$
$^3\text{He}/\text{H}$	$0.9441 (+ 0.511 - 0.466) \times 10^{-5}$	$(0.9 - 1.3) \times 10^{-5}$
$^7\text{Li}/\text{H}$	$4.683 (+ 0.335 - 0.292) \times 10^{-10}$	$(1.58 \pm 0.31) \times 10^{-10}$



FIM DA AULA 9