

# O Big Bang

Ronaldo E. de Souza  
`mailto:ronaldo@astro.iag.usp.br`



21 de maio de 2007

## 1 O fundo de Microondas

- A era Arno Penzias & Robert Wilson
- A era COBE
- O corpo Negro
- anisotropia de Dipolo

## 2 A era da Radiação

- Densidade de matéria e radiação
- Eq. de Friedmann na era da radiação
- interação dos fótons com a matéria
- Eras Térmicas

## 3 A Nucleossíntese Primordial

- Formação do deutério
- Formação do  $^4\text{He}$
- Resumo da Nucleossíntese Primordial
- Abundância de Bárions

## 4 Problemas

## A polêmica dos anos 40

- Nos primeiros instantes o Universo era quente, e estava em rápida expansão. Nestas condições ( $T \simeq 10^{10}\text{K}$ ) e poderia ocorrer a formação do Hélio tal qual ocorre nas estrelas. (George Gamow)
- Este modelo do Big Bang é uma grande bobagem. O Universo deve ter a mesma aparência em qualquer instante do tempo. Para compensar a expansão cosmológica a matéria deve brotar espontaneamente como uma transição do vácuo ( Fred Hoyle)



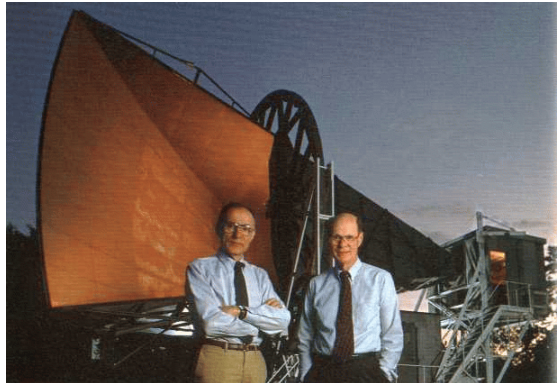
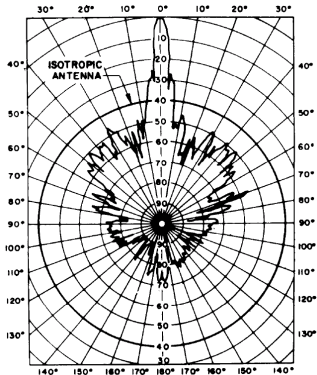
George Gamow

Fred Hoyle

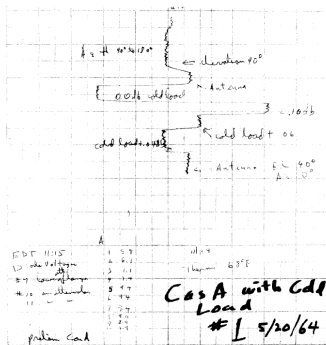
- História térmica do Universo.
- Formação dos elementos leves.
- Abundância dos bárions.
- Parâmetros cosmológicos.
- Formação das galáxias e aglomerados de galáxias.



- Antena projetada em 1960 para testes de comunicação de baixo ruído com o satélite echo.
- Sistema direcional de baixo ruído ( $< 0.05$  K).

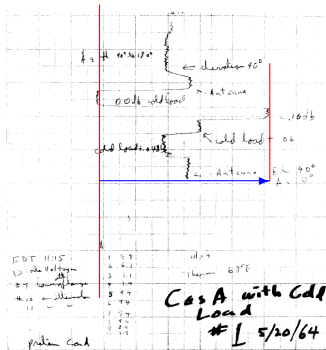


- O sinal observado no fundo de céu não pode ser explicado seja por ruído da antena, pelo detector ou por fontes terrestres.
- Portanto, este sinal é real e a sua origem é cósmica com uma temperatura da ordem de 3K.



Registro original da descoberta

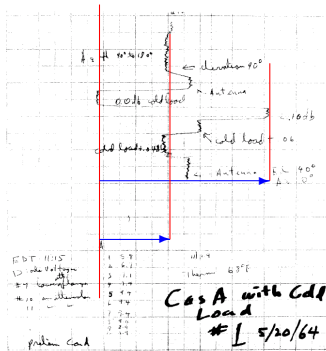
- O sinal observado no fundo de céu não pode ser explicado seja por ruído da antena, pelo detector ou por fontes terrestres.
- Portanto, este sinal é real e a sua origem é cósmica com uma temperatura da ordem de 3K.



Registro original da descoberta

- O sinal observado no fundo de céu não pode ser explicado seja por ruído da antena, pelo detector ou por fontes terrestres.
- Portanto, este sinal é real e a sua origem é cósmica com uma temperatura da ordem de 3K.

Registro original da descoberta





Não muito longe dali Robert Dicke, Jim Peebles e Dave Wilkinson estavam planejando medir o fundo de radiação conforme havia sido previsto por Gamow e colaboradores no final dos anos de 1940!

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 75, NUMBER 7

APRIL 1, 1949

### Remarks on the Evolution of the Expanding Universe\*.<sup>†</sup>

RALPH A. ALPHER AND ROBERT C. HERMAN  
*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University, Silver Spring, Maryland*  
(Received December 27, 1948)

The relativistic energy equation for an expanding universe of non-interconverting matter and radiation is integrated. The above result, together with a knowledge of the physical conditions that prevailed during the element forming process in the early stages of the expansion, is used to determine the time dependences of proper distance as well as of the densities of matter and radiation. These relationships are employed to determine the mean galactic diameter and mass when formed as  $2.1 \times 10^3$  light years and  $3.8 \times 10^7$  sun masses, respectively. Galactic separations are computed to be of the order of  $10^6$  light years at the present time.

#### I. INTRODUCTION

WITH the experimental and theoretical information now available it is possible to give a

\* The work described in this paper was supported by the Bureau of Ordnance, U. S. Navy, under Contract NOrd-7386.  
<sup>†</sup> A preliminary account of this work was given at the New

tentative description of the structure and evolution of the universe. Investigations of cosmological models of various types have been carried out which explain many of the features of the observed York meeting of the American Physical Society, January, 1949.

Penzias e Wilson foram agraciados com o prêmio Nobel de 1978 pela relevância da descoberta no entendimento do Universo.



## Idéia original de Gamow

- Talvez os elementos químicos leves observados no Universo tenham sido construídos em uma fase do Universo primordial em que a temperatura era elevada (  $10^{10}$  K) e matéria e radiação estavam em equilíbrio termodinâmico.
- A densidade nesta fase devia ser comparável àquela que ocorre no carôço central das estrelas (  $1 \text{ g/cm}^3$  ).
- Como a densidade atual do Universo é da ordem de  $10^{-30} \text{ g/cm}^3$  e  $\rho R^3 = \rho_0$  concluímos que houve uma expansão por um fator da ordem de  $R=10^{10}$ .
- Lembrando que  $TR = T_0$  o resultado final é que o Universo atual deve estar preenchido com um fundo de radiação cuja temperatura deve ser da ordem de 1 K.

A detecção da radiação de fundo cosmológica e a prova de evolução das radiofontes mostrou que o Big Bang era de fato a melhor hipótese.

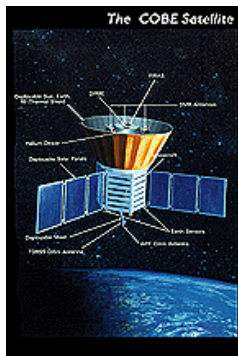
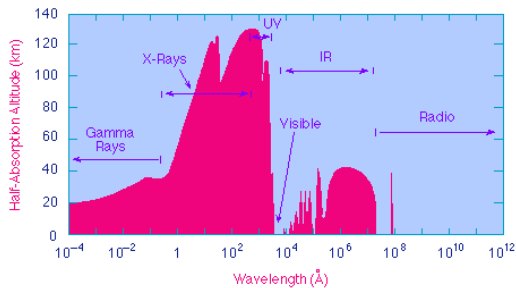
Componente	Intensidade $10^{-12}$ $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ $sterad^{-1}$
Lua Cheia	$10^{12}$
Airglow	600
Luz Zodiacal na Eclíptica	2500
Luz Zodiacal fora da Eclíptica	1000
Estrelas Brilhantes ( $m_V < 6$ )	250
Estrelas no Plano Gal.	2500
Estrelas fora do Plano Gal.	600
Luz difusa da Galáxia	250
Luz difusa Cósmica	10

## Distribuição da radiação de fundo em faixas espectrais.

Faixa espectral	Densidade de energia $\text{ev} \cdot \text{m}^{-3}$	Densidade de fótons $\text{m}^{-3}$
Rádio	$\simeq 5 \times 10^{-2}$	$\simeq 10^6$
Microondas	$\simeq 3 \times 10^5$	$5 \times 10^8$
Infravermelho	?	?
Óptico	$\simeq 2 \times 10^3$	$\simeq 10^3$
Ultravioleta	?	?
Raios X	75	$3 \times 10^{-3}$
Raios $\gamma$	25	$3 \times 10^{-6}$

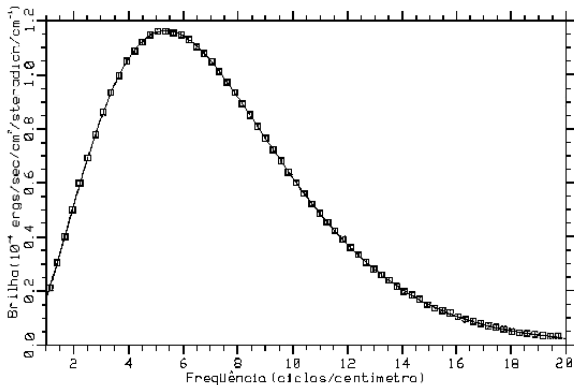
A radiação de fundo se concentra na região de microondas.

Para evitar a absorção atmosférica as observações mais precisas da CMBR devem ser feitas a partir de satélites.

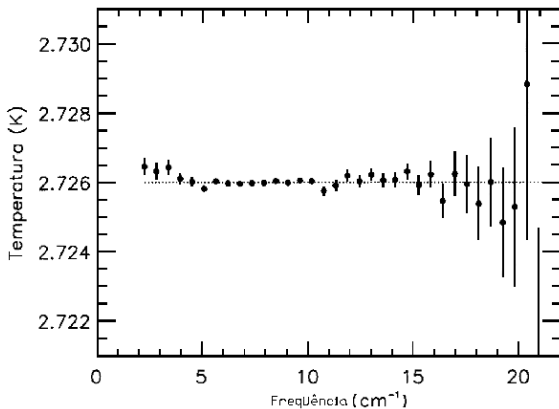


## A revolução do satélite COBE

A radiação de fundo é um corpo negro de 2.726 K.



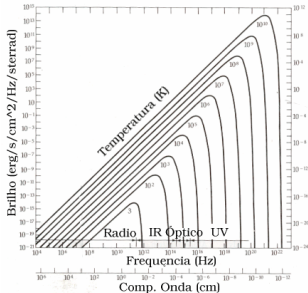
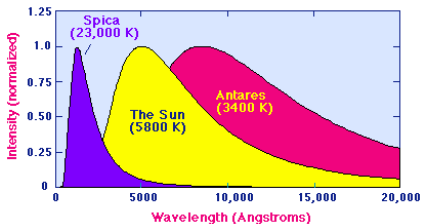
O universo primordial estava muito próximo do equilíbrio termodinâmico





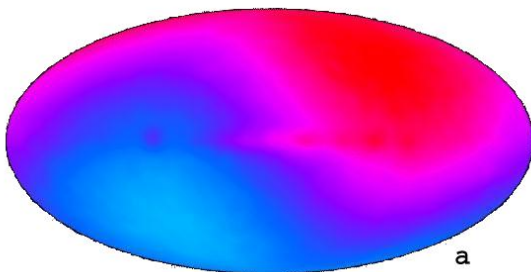
A radiação de corpo negro depende apenas da temperatura.

$$dE = B_{\lambda}(T) dt d\lambda dA \cos \theta d\Omega$$
$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda KT) - 1}$$
$$\lambda_{max} T = 02898 K.cm$$

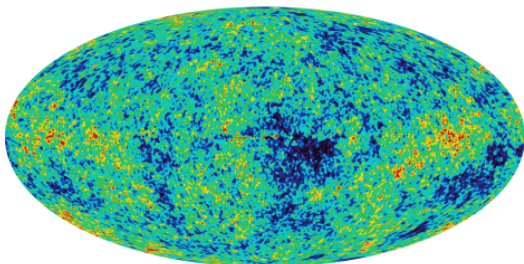


Devido ao nosso movimento ao fundo de radiação,  
 $v \simeq 600 \text{ km/s}$ , a temperatura depende da direção em que a  
observamos. Como  $\lambda = \lambda_0(1 - v/c)$  obtemos

$$T = \frac{T_0}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \simeq T_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos \theta\right)$$



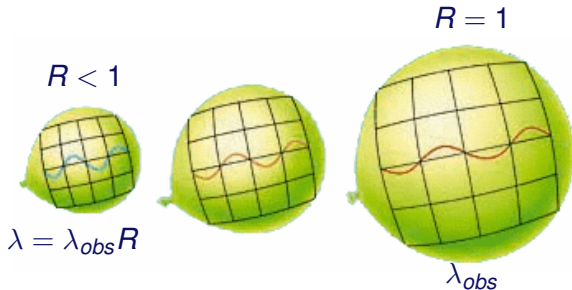
A anisotropia da radiação de fundo, observada pelo satélite WMAP, após a subtração do efeito de dipolo corresponde a desvios de temperatura da ordem de  $\Delta T/T \simeq 10^{-5}$ , ilustrando o grau de equilíbrio termodinâmico no Universo primordial.



- Em algum momento da evolução do Universo a matéria e a radiação estavam em equilíbrio termodinâmico, confirmando as idéias de Gamow.
- Posteriormente a radiação desacoplou-se da matéria preservando o espectro de corpo negro que observamos hoje como um registro fóssil da era da radiação.
- Em que momento ocorreu esta transição e quais foram as conseqüências deste estado de equilíbrio termodinâmico inicial?

A evolução do Universo primordial é determinada pelo fato de que a energia dos fótons da radiação de fundo era muito maior naquela época.

$$\epsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$



Como o fundo de microondas tem um espectro de corpo negro a densidade de radiação integrada em todos os comprimentos de ondas segue a lei de Stefan-Boltzmann

$$u = aT_0^4 = 4,1780 \times 10^{-13} \text{ erg/cm}^3$$

Como os fótons contribuem com uma inércia equivalente  $E = mc^2$  este fundo de radiação corresponde a uma densidade de massa

$$\rho_{r0} = \frac{3P_{r0}}{c^2} = \frac{aT_0^4}{c^2} = 4,6486 \times 10^{-34} \text{ g/cm}^3$$

Correspondendo a um parâmetro de densidade  $\Omega_{r0} = 2,3 \times 10^{-5} h^{-2}$ .

mas no passado a contribuição da radiação era muito importante porque um corpo negro obedece à lei de Wien

$$\lambda_{max} T = 0,2898 K \cdot cm$$

como a expansão cosmológica afeta o comprimento de onda ( $\lambda \propto R$ ) no passado os fótons desse fundo eram mais energéticos resultando num aumento de temperatura

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1}{R} = 1 + z$$

em consequência a densidade de energia no campo de radiação era muito maior no passado

$$\rho_r = \rho_{r0} R^{-4} = \rho_{r0} (1 + z)^4$$

Observe que a densidade de massa era também maior no passado, mas com uma dependência diferente

$$\rho_m = \rho_{m0} R^{-3} = \rho_{m0} (1 + z)^3$$

e o resultado é que a densidade de energia no campo de radiação era proporcionalmente mais importante no passado

$$\frac{\rho_r}{\rho_m} = \frac{\rho_{r0}}{\rho_{m0}} \frac{1}{R} = \frac{\rho_{r0}}{\rho_{m0}} (1 + z)$$

como  $\rho_{rad}/\rho_m \simeq 0,001$ , considerando-se apenas a matéria bariônica na forma de galáxias, a densidade de energia do campo de radiação deve ter dominado o Universo a partir de  $1 + z \simeq 1\,000$ .



A presença da radiação altera fortemente a evolução do Universo primordial e portanto a equação de Friedmann deve ser modificada com a inclusão do termo de densidade de radiação

$$\dot{R}^2 - \frac{8\pi}{3} GR^2 \left( \frac{\rho_{m0}}{R^3} + \frac{\rho_{r0}}{R^4} \right) = -\frac{kc^2}{\mathcal{R}_0}$$

Podemos verificar que quando  $R \rightarrow 1$ , ou seja, no instante atual, a contribuição da radiação é desprezível já que  $\rho_{m0} \gg \rho_{r0}$  e recuperamos a equação de expansão obtida anteriormente.

Quando  $R \rightarrow 0$  ocorre exatamente o contrário, já que nesta fase  $R^{-4} \gg R^{-3}$ . Como o termo de curvatura pode ser desprezado nos instantes iniciais podemos adotar a aproximação de um Universo plano,  $k = 0$  ou  $\Omega = 1$

$$\dot{R}^2 \simeq \frac{8\pi}{3} G \rho_{r0} \frac{1}{R^2}$$

cuja solução é dada pela expressão

$$R = \left(\frac{t}{t_r}\right)^{1/2}$$

vfill

$$t_r = \frac{1}{\sqrt{\frac{32\pi}{3} G \rho_{r0}}} = 3,1017 \times 10^{19} \text{ s}$$

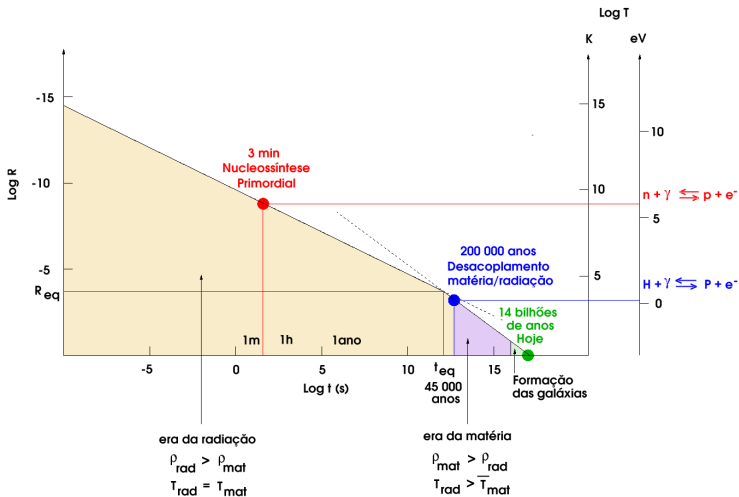
Na época em que o Universo era dominado pela radiação, a expansão estava variando fortemente com a idade.

$$\rho_r = \frac{\rho_{r0}}{R^4} = \frac{3}{32\pi G t^2} = \frac{4,4723 \times 10^5}{t^2} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$$

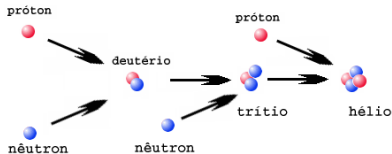
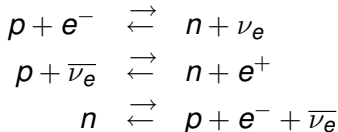
Esta solução independe da constante de Hubble e do parâmetro de densidade. Não importa se o Universo é aberto, fechado ou crítico, a variação temporal do parâmetro de escala e da densidade de energia quando  $t \rightarrow 0$  dependem apenas da constante de gravitação universal e da densidade atual do campo de radiação. Ou seja as condições físicas neste período são muito bem conhecidas com erro comparável às estimativas da temperatura do fundo de microondas.

$$T = \frac{T_0}{R} = T_0 \left( \frac{t_r}{t} \right)^{1/2} = \frac{1,518 \times 10^{10} \text{ K}}{\sqrt{t}} = \frac{1,308 \text{ MeV}}{\sqrt{t}}$$

Em  $t = 1/10000$  s, a densidade era de  $4,5 \times 10^{13} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , e a temperatura,  $1,52 \times 10^{12} \text{ K} = 130 \text{ MeV}$ , muito superior à energia de ligação dos núcleos compostos. Os elementos químicos tal como conhecemos, com energias de ligação de alguns MeV, não existiam. Apenas núcleos simples como os prótons e nêutrons, com energias de ligação da ordem de 939 MeV, podiam resistir à radiação. Mais próximo da singularidade inicial, a situação era ainda mais drástica. Por volta de  $10^{-6}$  s a temperatura era dez vezes superior, a densidade cem vezes maior, e nem mesmo os prótons poderiam resistir aos fótons.



Após a bariogênese, uma grande quantidade de nêutrons surgiu graças às interações entre prótons e elétrons. Esse processo começou com a criação de novos nêutrons, a partir dos prótons e elétrons já presentes no meio.



As abundâncias de equilíbrio dependem da pequena diferença de massa entre prótons e nêutrons

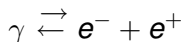
$$\Delta E = (m_n - m_p)c^2 = 1,293 \text{ MeV}$$

e considerando que os prótons e nêutrons estão frios, isto é, não relativísticos, temos pela lei de Boltzmann,

$$\frac{N_n}{N_p} = e^{-\frac{\Delta E}{kT}} = e^{-0,987t^{1/2}}.$$

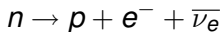
válido enquanto a temperatura era maior que 0,8 MeV, correspondendo a uma idade do Universo  $t = 2,7 \text{ s}$ , quando a fração de nêutrons atingiu o valor  $N_n/N_p \simeq 0,20$ .

Em temperaturas mais baixas as reações que alimentam o meio com novos nêutrons, mantendo o equilíbrio estatístico entre essas partículas e os prótons, cessam de existir devido a uma redução tanto no suprimento de neutrinos como dos pares pósitron-elétron, que viabilizam essas reações. A presença abundante dos pares pósitron-elétron necessita de uma temperatura média superior a  $1,0222 \text{ MeV} = 1,2 \times 10^{10} \text{ K}$  para que ocorra a reação de equilíbrio





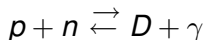
Quando a temperatura se aproximou de 0,8 MeV, essas reações cessaram de ocorrer e a fração de nêutrons se congelou no valor mencionado acima. Mas, essa fração não se mantém constante, porque o nêutron, quando livre, é uma partícula instável que decai progressivamente



com uma meia-vida bastante curta  $\tau_{1/2} = 615 \pm 2$  s. Quando as reações responsáveis pela criação de novos nêutrons deixaram de ser eficientes a densidade dessas partículas começou a decair exponencialmente com o tempo,

$$N_n = N_{n0} e^{-0,693t/\tau_{1/2}}$$

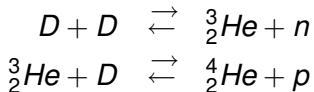
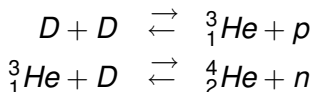
Se os nêutrons fossem deixados intactos no meio, a sua fração decairia rapidamente a um valor próximo de zero. Felizmente ocorreu uma outra reação crucial



a qual fixa o nêutron no núcleo de deutério cuja energia de ligação é de apenas 2,22 MeV e pode ser facilmente destruído pelos fótons energéticos presentes no meio. Quando a temperatura caiu para  $10^9$  K a fração desses fótons se reduziu favorecendo a criação do deutério.

Nesse ponto o Universo estava com uma idade de aproximadamente 231 s, e se passaram 228 s desde o instante em que os nêutrons deixaram de ser criados. Portanto, a fração de nêutrons caiu de 200 partículas, para cada volume com 1000 prótons, para 155. Em consequência, 45 nêutrons decaíram e o número total de prótons atingiu 1045, dentro daquele volume inicial que consideramos. Devido a esse decaimento, a fração de nêutrons para prótons no meio caiu para  $N_n/N_p = 0,148$ . Como a seção de choque para formação do deutério é da ordem de  $10^{-28} \text{ cm}^2$  o tempo de captura dos nêutrons foi de somente 8 s. Portanto, esse processo de fixação dos nêutrons em deutério foi muito eficiente, e ocorreu quase que instantaneamente, comparado com a idade do Universo.

A formação do deutério, viabilizou a formação do  $^4\text{He}$ , através das reações

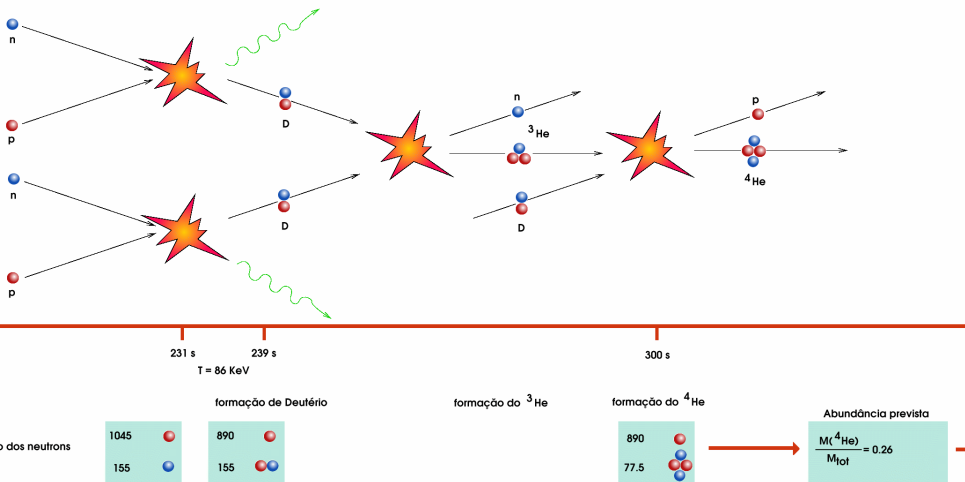


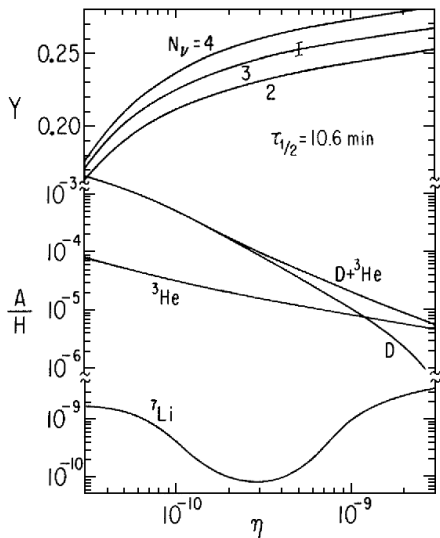
E praticamente todo o deutério que havia surgido se transformou no  $^4\text{He}$  que observamos hoje no Universo.

Portanto, no nosso volume contendo 155 nêutrons e 1045 prótons, podemos criar, após usar todos os átomos de deutério, um total de 77,5 átomos de  $^4\text{He}$ , deixando um saldo de 890 prótons remanescentes. Assim, a abundância final de  $^4\text{He}$ , medida pela sua fração em massa, deve ser

$$Y = \frac{M(^4_2\text{He})}{M(p) + M(^4_2\text{He})} = \frac{4 \times 77,5}{890 + 4 \times 77,5} = 0,26$$

mostrando um acordo bastante razoável com as observações astronômicas que indicam  $Y = 0,23 - 0,25$ .





O processo de nucleossíntese depende da densidade de bárions,  $n_b$ . Uma forma de explicitar essa dependência consiste em usar o parâmetro

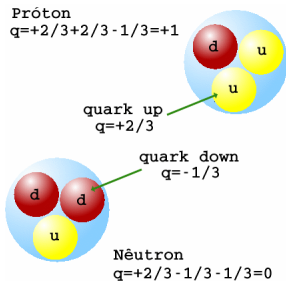
$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} = \frac{n_{b0} R^{-3}}{n_{\gamma 0} R^{-3}} = \frac{n_{b0}}{n_{\gamma 0}}$$

que relaciona a abundância dos bárions com a abundância dos fótons  $n_\gamma$ . E para que esta abundância tenha resultado do processo de nucleossíntese primordial, devemos ter

$$1,2 \times 10^{-10} \leq \eta \leq 3 \times 10^{-10}$$



As taxas de reação dependem da densidade de bárions presentes no meio especificada através do parâmetro  $\eta$ , cujo valor se manteve inalterado e pode ser inferido a partir do Universo local.



O parâmetro  $\eta$  é estimado das observações da radiação de fundo, e da densidade atual de massa. Para um corpo negro, o número total de fótons é

$$n_\gamma = \int_0^\infty n_\gamma(\nu) d\nu = 0,370 \frac{aT^3}{k} \simeq 411 \pm 4 \text{ cm}^{-3}$$

O número de bárions é obtido da estimativa do parâmetro de densidade. Como  $\Omega_{0b} = \rho_{0b}/\rho_{0c}$  temos

$$n_{0b} = \Omega_{0b}\rho_{0c}/m_H = 1,124 \times 10^{-5} \Omega_{0b} h^2 \text{ cm}^{-3}$$

Utilizando a definição do parâmetro  $\eta$  obtemos

$$\eta = 2,737 \times 10^{-8} \Omega_{0b} h^2$$

Como os bárions estão presentes nas estrelas e no gás difuso, basta fazer um censo dessas componentes e estimar  $\Omega_{0b}$ . A densidade de bárions, baseadas na massa contida nas galáxias, indica que  $\Omega_{0b} \simeq 0,04$  e portanto podemos estimar  $\eta \simeq 1,1 \times 10^{-9} h^2$ , valor esse que está muito próximo das estimativas baseadas na nucleossíntese primordial. Portanto concluímos que a massa observada na forma de galáxias é aquela necessária para a criação dos elementos leves na nucleossíntese primordial. Mas a densidade na forma de galáxias é claramente insuficiente para prover a densidade crítica que nos permita adotar o modelo plano. Portanto, se houver uma componente adicional de massa presente no Universo que nos leve a  $\Omega = 1$ , essa deve necessariamente estar contida na forma de uma matéria escura não bariônica.

- 1 Estime o valor do *redshift* em que a densidade de radiação era igual à densidade de matéria. Qual era a densidade de partículas e a temperatura da radiação nessa época?
- 2 Mostre a partir da equação de Friedmann que, na era da radiação, se considerarmos  $\rho_r \gg \rho_m$ , devemos ter

$$\Omega = 1 + \frac{kc^2}{\dot{R}^2 \mathcal{R}_0} = 1 + \frac{H_0^2(\Omega_0 - 1)}{\dot{R}^2}$$

Refaça o argumento do capítulo 2 e mostre qual deveria ser o parâmetro de densidade no final da era de Planck.

- 3 Mostre que na época da nucleossíntese primordial os prótons e nêutrons já se encontravam na fase não relativística.

FIM