

A Descoberta da Radiação Cósmica de Fundo

Ronaldo E. de Souza

<mailto:ronaldo@astro.iag.usp.br>

<http://www.astro.iag.usp.br/~ronaldo/intrcosm/Notas/index.html>



21 de junho de 2007

Relevância do Estudo da Radiação de Fundo
Arno Penzias e Robert Wilson
A Concepção Original de Gamow
A Consagração

A Missão COBE
Radiação Cósmica e Corpo Negro
Origem da Radiação Cósmica de Fundo
O Redshift Cosmológico

Evolução da Temperatura
Evolução da densidade de Matéria
Radiação x matéria
Eras Térmicas

Formação do ^4He primordial
Formação dos Elementos Leves no Big Bang
Densidade de Bárions
Teoria x Observação

... e, em um domingo calmo e sonolento ...





Ora direis ouvir estrelas! Certo,

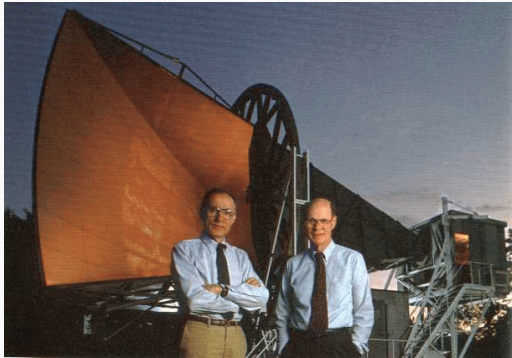
Perdeste o senso! E eu vos direi, no entanto,

que para ouvi-las, muita vez desperto

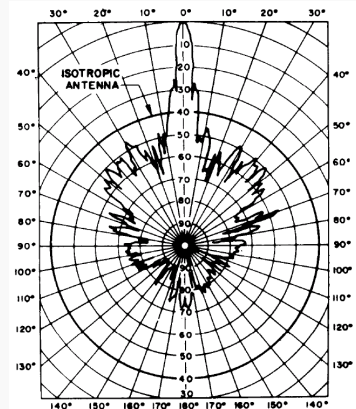
E abro a janela, pálido de espanto.

Olavo Bilac

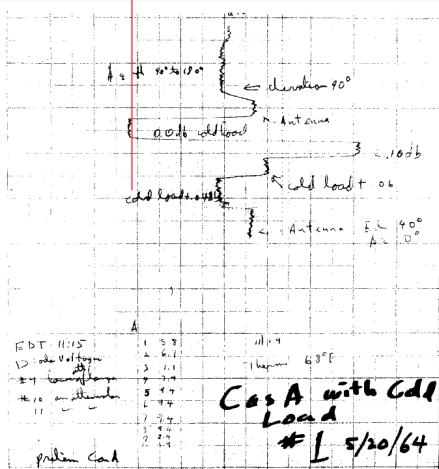
- * História térmica do Universo
- * Formação dos elementos leves
 - * Abundância dos bárions
 - * Parâmetros cosmológicos
 - * Formação das galáxias
- * Formação dos aglomerados de galáxias



- Antena projetada em 1960 para testes de comunicação de baixo ruído com o satélite echo.
- Sistema direcional de baixo ruído (< 0.05 K) operando em $\lambda = 7.35$ cm.

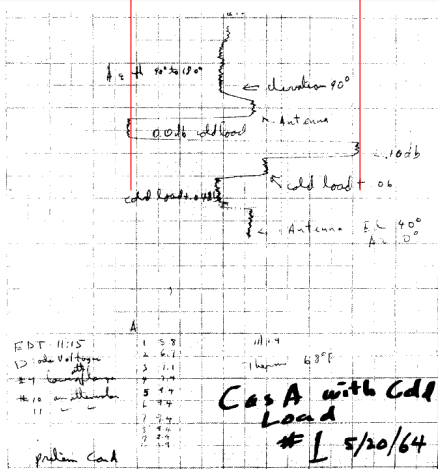


Ponto Zero



Ponto Zero Fonte de Calibração

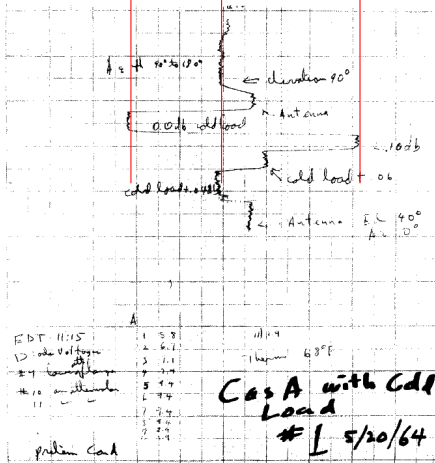
← 0.1 db = 6.6 K →



Ponto Zero Fonte de Calibração

0.1 db = 6.6 K

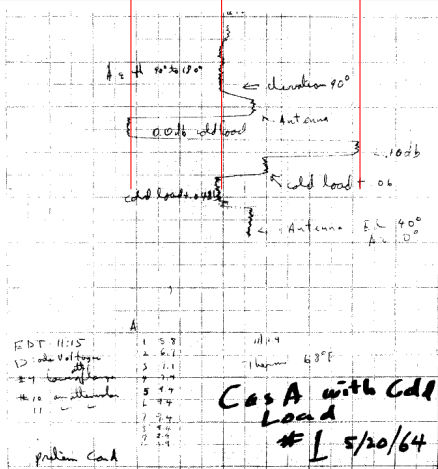
$T_{CEU} = 3.0 \text{ K}$



Ponto Zero Fonte de Calibração

0.1 db = 6.6 K

$T_{ceu} = 3.0 \text{ K}$



O excesso de sinal observado no fundo de céu não pode ser explicado seja pela antena, pelo detector ou pela contaminação de fontes terrestres. Portanto o sinal é real e a sua origem é cósmica.

E 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^{*,†}

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 2.1×10^3 light years and 3.8×10^7 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.

† 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.

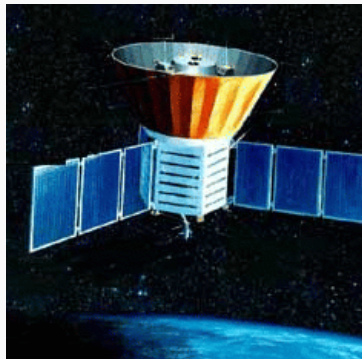
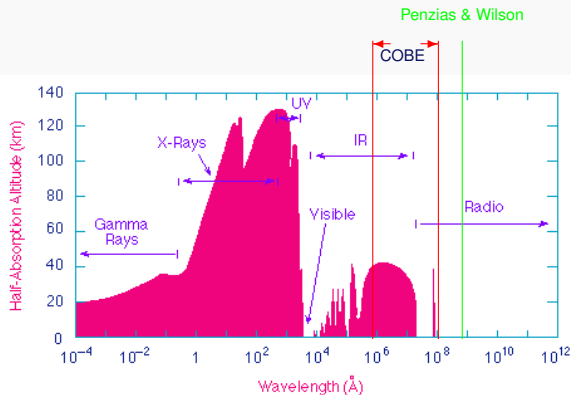
1. Talvez os elementos químicos observados no Universo tenham sido construídos em uma fase do Universo primordial em que a temperatura era elevada ($\simeq 10^{9-10}\text{K}$) e matéria e radiação estavam em equilíbrio termodinâmico.
2. A densidade nesta fase devia ser comparável àquela que ocorre no carôço central das estrelas ($\simeq 1\text{g/cm}^3$).
3. Como a densidade atual do Universo é da ordem de 10^{-30}g/cm^3 , concluímos que houve uma expansão por um fator da ordem de 10^{10} .
3. O resultado final é que o Universo deve estar preenchido com um fundo de radiação cuja temperatura hoje deve ser da ordem de 1 K.



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

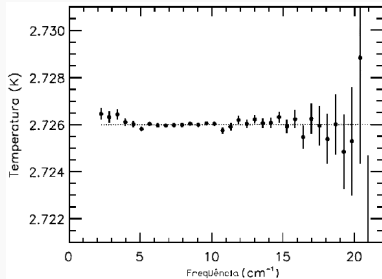
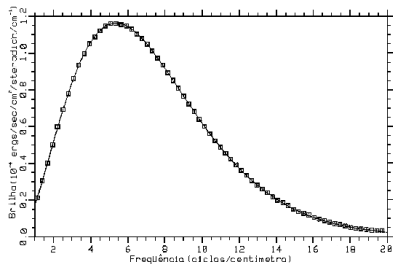


Para estudar a radiação de fundo adequadamente é preciso utilizar experimentos a bordo de satélites para evitar a absorção atmosférica.

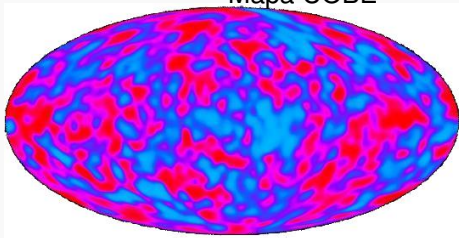


A temperatura do fundo de radiação, $T_0 = 2.726 \pm 0.01$ K, e segue detalhadamente a lei de Planck prevista para um corpo negro, indicando portanto uma origem térmica.

$$B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda KT) - 1}$$



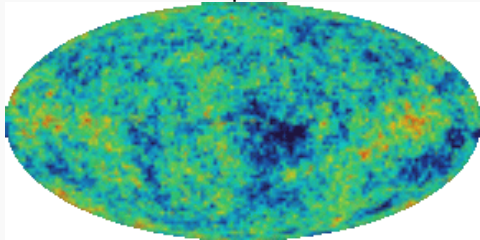
Mapa COBE



Mas apesar de muito diminutas
as flutuações de temperatura,
da ordem de milésimos de grau,

são reais e mostram como matéria
e radiação estavam acopladas
na superfície de último espalhamento

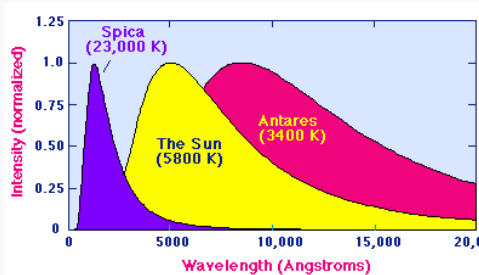
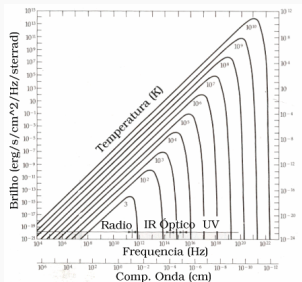
Mapa WMAP



O corpo negro decorre de um estado de equilíbrio termodinâmico entre matéria e radiação e o máximo de intensidade, pela lei de Wien, ocorre no comprimento de onda,

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

O pico desloca-se para o azul quanto maior a temperatura.

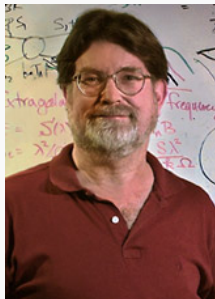
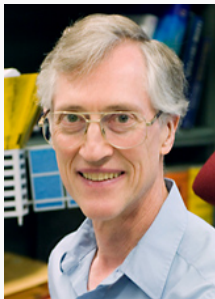


- ▶ Em algum momento da evolução do Universo a matéria e a radiação estavam em equilíbrio termodinâmico, confirmando as idéias de Gamow.

- ▶ 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?

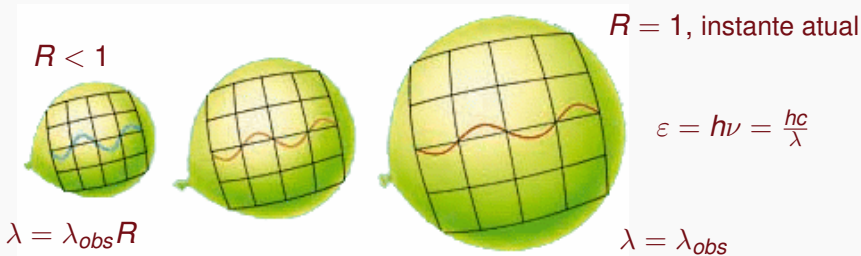
O prêmio Nobel de 2006 foi concedido a John C. Mather e George F. Smoot pela descoberta da forma de corpo negro da radiação de fundo e pela descoberta da anisotropia da radiação de fundo.



Se consideramos uma região que atualmente tem uma dimensão L_{obs} a sua dimensão no passado era menor

$$L = RL_{obs},$$

onde R é o chamado fator de escala. Hoje $R = 1$ mas no passado $R < 1$ e conseqüentemente os fótons da radiação de fundo eram muito mais energéticos no universo primordial.



Uma consequência do redshift é que no universo primordial a temperatura da radiação cósmica era muito maior,

$$T = \frac{T_0}{R}$$

Por exemplo quando $R=0.001$ a temperatura do fundo de microondas era mil vezes maior ou cerca de 3 000 K.



A densidade de energia atual da radiação é igual a

$$\rho_{r0} = \frac{N_{\text{fótons}} \epsilon}{L_0^3 c^2}$$

devido à evolução do elemento de volume e da energia dos fótons a densidade de energia no universo primordial era

$$\rho_r = \frac{\rho_{r0}}{R^4}$$

ou seja, quando $R = 0.001$ a densidade de energia do campo de radiação era cerca de um trilhão de vezes superior ao seu valor atual.

Devido à compressão do volume a densidade de matéria no universo primordial era

$$\rho_m = \frac{\rho_{m0}}{R^3}$$

portanto, quando $R = 0.001$ a densidade de matéria era um bilhão de vezes superior à atual.

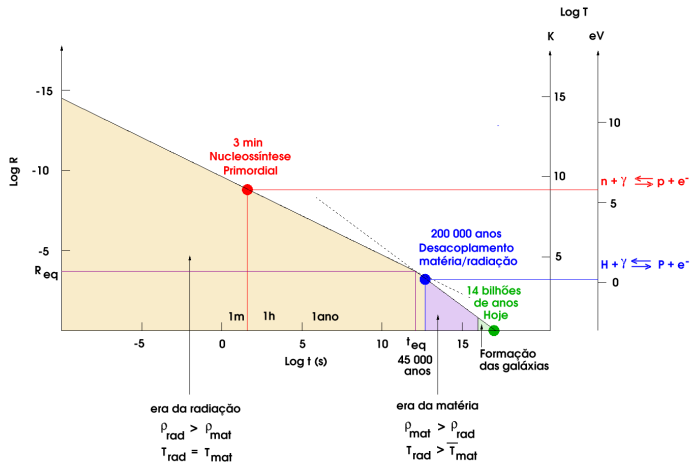
O resultado final é que a densidade de energia no campo de radiação se torna superior à densidade de matéria quanto mais nos aproximamos do universo primordial.

Como a densidade de energia no campo de radiação evolui mais rapidamente houve um momento no universo primordial em que a radiação era dominante.

$$\frac{\rho_r}{\rho_m} = \frac{\rho_{r0}}{\rho_{m0}} \frac{1}{R}$$

Portanto, como atualmente a densidade de matéria é cerca de mil vezes maior, resulta que por volta de $R = 0.001$, ou $z = 1000$, a densidade no campo de radiação era igual à densidade de matéria.

Os elementos químicos complexos não existiam no Universo primordial!



**Big
Bang**

Time →

| 10^{-44} s | 10^{-35} s | 10^{-32} s | 10^{-10} s | 300 s | 3×10^5 yr | 1×10^9 yr | 15×10^9 yr |
|-----------------------|--------------|------------------|---------------------|-----------------|----------------------|------------------------------|---------------------|
| Superstring(?) Era | GUT Era | Inflation Era | Electro-weak Era | Particle Era | Recombination Era | Galaxy and Star Formation | Present Era |

S

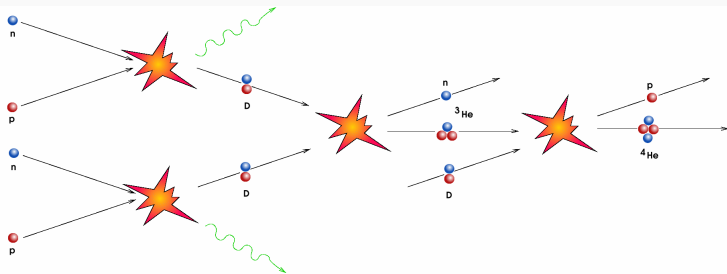
EW

EW

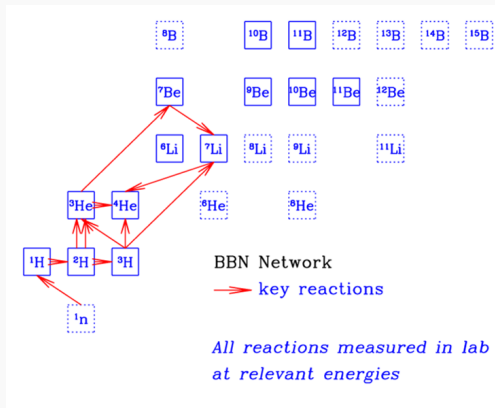
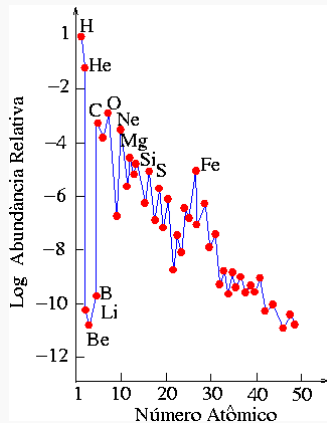
E

W

A formação do ^4He primordial durou cerca de 5 minutos!



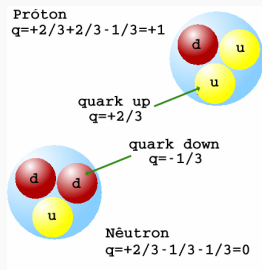
Devido à rápida expansão somente os elementos leves se formaram na fase da nucleossíntese primordial. Os elementos mais pesados foram sintetizados nas estrelas.

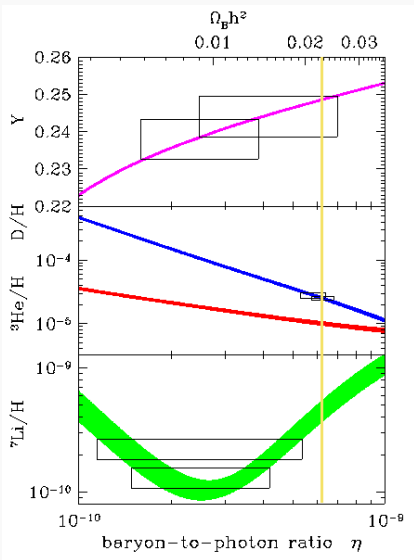


As taxas de reação dependem da densidade de bárions presentes no meio especificada através do parâmetro,

$$\eta = \frac{n_{\text{barions}}}{n_{\text{fotons}}} \simeq 6.14 \times 10^{-10}$$

Cujo valor se manteve inalterado e que pode ser inferido a partir de observações no Universo local.





O acordo dos cálculos detalhados com as medidas empíricas de abundâncias dos elementos leves é um dos pilares da Cosmologia moderna.

FIM

