Radiação Cósmica de Fundo

Elói Ugo Pattaro

Introdução a Cosmologia Física – 4300430
Prof. Dr. Raul Abramo

12 de Novembro de 2015

Introdução

A cosmologia busca formular e entender modelos para a evolução do universo e das estruturas pertencentes a ele. Uma radiação cósmica de fundo (CMB) remanescente é prevista no modelo cosmológico atualmente aceito do Big Bang.

Essa radiação se da de maneira isotrópica e uniforme, e pode ser entendida como a luz remanescente mais antiga do universo, datando da época da recombinação, quando o universo tinha "apenas" 380.000 anos.

Historia

Dois astrônomos de radio nos Estados Unidos, Arno Penzias e Robert Wilson, estavam tentando efetuar medições de sinais de $\lambda_{microwave}$ refletidos por satélites em orbita quando se depararam com um problema de ruído nas suas medições. Em busca de melhorar suas medições tentaram encontrar a causa técnica do ruído, sem sucesso. Acabaram por perceber que o mesmo se dava de maneira isotrópica e invariante com o tempo.

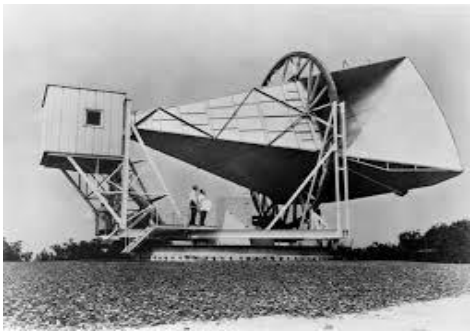

Imagem 1: Antena do laboratório Bell utilizada por Penzias e Wilson para fazer a primeira medição da CMB.

Em paralelo, na mesma época, o físico Robert Dicke, da *Princeton University*, previa a existência da CMB caso o universo tivesse começado num estado quente e denso. Para tentar validar sua teoria, o mesmo já estava no processo de construir uma antena de $\lambda_{microwave}$, quando foi colocado em contato com Penzias e Wilson.

Medições

As medições iniciais feitas por Penzias e Wilson estavam longe de serem ideais, eles observaram a CMB em um $\lambda = 7.35\ cm$, que é cerca de 40 vezes maior do que o comprimento de onda onde o espectro da CMB atinge seu pico.

O problema em se observar a CMB da Terra é que para $\lambda \leq 3cm$ a radiação interage com moléculas de água, sendo facilmente absorvida. Logo, para se efetuar medições da Terra, é

aconselhado se utilizar de lugares com baixa umidade e altas atitudes. Normalmente tais medidas são feitas com equipamentos em balões, lançados no polo Sul.

Naturalmente, para se obterem medidas melhores, elas devem ser feitas de fora da atmosfera terrestre. Em 1989 o satélite COBE foi o primeiro a medir um grande espectro com precisão da CMB.

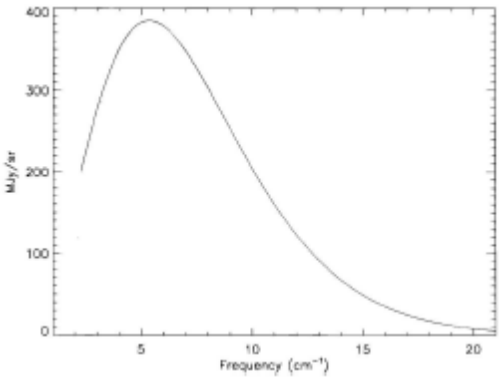

Figure 1: Espectro da CMB, como medido pelo satélite COBE (as incertezas são menores do que a espessura da linha).

Resultados

Há três resultados importantes das medições efetuadas pelo satélite COBE.

Primeiro: Para qualquer direção em que se efetuava a medição o espectro observado se comporta como o de um corpo negro ideal (figura 1).

Segundo: As temperaturas observadas apresentação uma distorção de dipolo, tendo temperaturas mais altas num polo e mais baixas no outro. Este efeito é devido ao efeito Doppler, proveniente do movimento do satélite ao redor da Terra ($\sim 8 kms^{-1}$), do movimento orbital da Terra ao redor do Sol ($\sim 30 kms^{-1}$), do movimento do Sol ao redor do centro da Galáxia ($\sim 220 kms^{-1}$) e do movimento da mesma por sua vez em torno do grupo local ($\sim 80 kms^{-1}$).

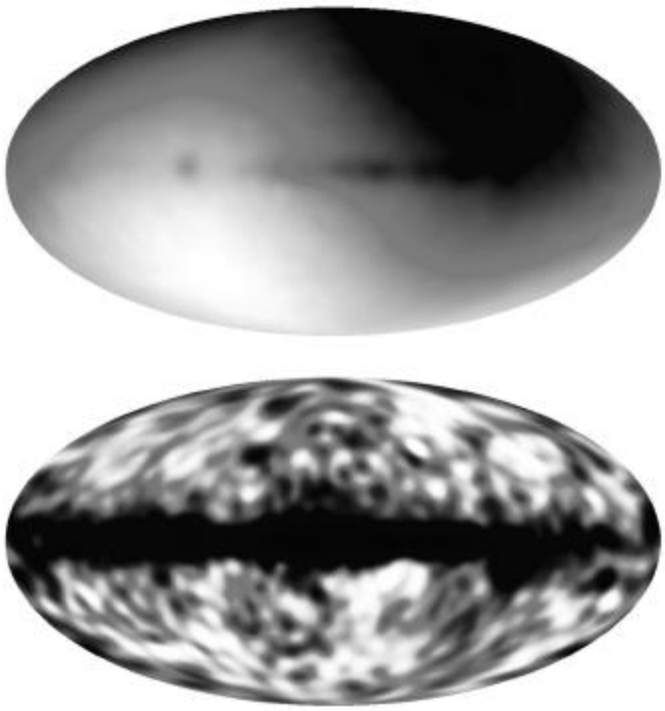

Figure 2: Imagens da flutuação da temperatura como medida pelo satélite COBE e depois da remoção do efeito de dipolo.

Terceiro: Depois de remover as distorções de dipolo da CMB, as flutuações remanescentes de temperatura tem uma amplitude muito pequena $\left(\frac{\delta T}{T} \cong 10^{-5}\right)$. Ou seja, nesta temperatura o universo é aproximadamente isotrópico.

Ao se remover o efeito de dipolo da CMB, temos como resultado que o sistema solar tem uma velocidade de $\cong 0.1\%\ c$ em relação a um referencial inercial da CMB.

Processo

Acredita-se que a CMB foi produzida num processo que pode ser melhor entendido se dividido em algumas etapas.

Inicio: Logo após o Big Bang o universo era basicamente uma mistura quente de partículas, um plasma de fótons, elétrons e prótons. Os fótons desta época tinham um caminho livre médio muito curto até encontrar um elétron livre. Desta maneira a luz não conseguia se propagar, dado

que devido ao constante processo de espalhamento Thomson havia perda de informação, sendo assim o universo nesta época opaco.

Recombinação: À medida que o universo se expandiu, o mesmo esfriou, permitindo assim que átomos de hidrogênio formados se mantivessem.

Desacoplamento: Uma vez que se deu a recombinação, há uma quantidade muito menor de elétrons livres no universo. O desacoplamento é o período em que o parâmetro de Hubble fica maior do que a razão com que os fótons sofrem espalhamento pelos elétrons. Em termos simples, é a época em que o universo fica "transparente a luz".

Ultimo espalhamento: É a época em que os fótons da CMB sofreram seu ultimo espalhamento devido a elétrons livres. Naturalmente esse processo não foi simultâneo para todos os fótons, e a "superfície" de ultimo espalhamento pode ser melhor entendida como uma "casca" de ultimo espalhamento.

Evento	Redshift	Temperatura (K)	Tempo (mega-anos)
Recombinação	1370	3740	0.24
Desacoplamento	1100	3000	0.35
Ultimo espalhamento	1100	3000	0.35

Picos Acústicos

A CMB inicialmente descoberta em 1960 era completamente uniforme. Apenas em 1992 (COBE) foram descobertas as flutuações de temperatura (da ordem de $\sim 10^{-5} T$).

Estas flutuações representam pequenas variações de densidade na "sopa primordial" do universo, que viriam a crescer por atração gravitacional e formar as estruturas de larga escala (estrelas, galáxias e aglomerados) conhecidas hoje.

Essas pequenas flutuações de temperatura, frequentemente referidas como "ruído", podem ser analisadas de maneira similar a como se analisaria um ruído "normal". Naturalmente para tal, devemos analisar o espectro das mesmas. Normalmente analisaríamos a evolução temporal de um ruído, porem não temos esta opção para a CMB. Temos então que nos satisfazer com uma analise em relação à frequência angular (chamada de **momento de multipolo** $\boldsymbol{l}^*$), ou seja, como se da à variação das oscilações de temperatura em termos da resolução angular.

**o termo $\boldsymbol{l}$ é aproximadamente o inverso da escala angular em radianos.*

O COBE possuía uma resolução angular de apenas 7 graus, podendo assim enxergar apenas as maiores flutuações angulares. Naturalmente então, o objetivo dos experimentos de CMB que sucederam o COBE foram em sua maioria de melhorar a resolução angular do mapa da CMB.

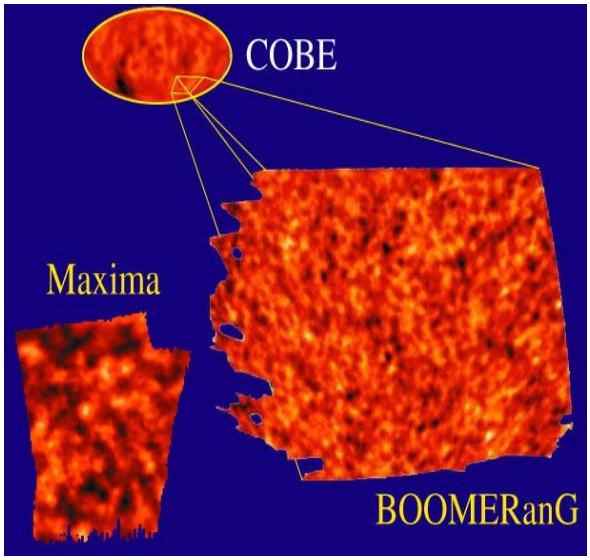

Imagem 2: Resolução dos experimentos BOOMERanG e Maxima em comparação com COBE.

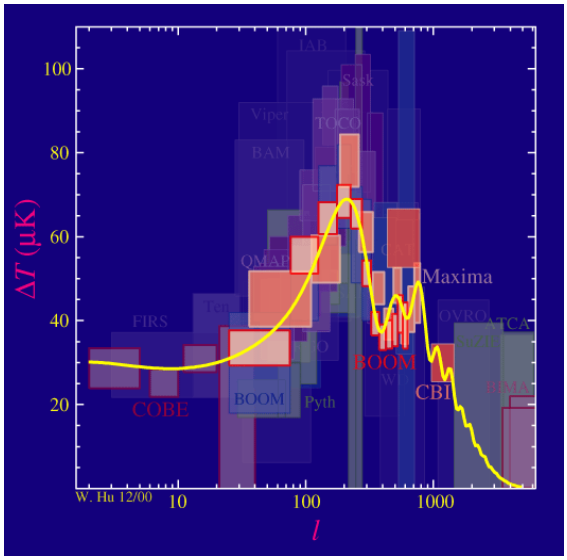

Figure 3: Espectro circa 2000 de ΔT por l

Para melhor entender a fonte destas flutuações de temperatura é necessário dar um passo para trás.

No universo primordial, havia uma espécie de sopa de barions e fótons. Acredita-se que duas principais forças agiam neste sistema; a gravidade, tentando comprimir este "fluido", e a pressão, exercida pela radiação, tentando expandi-lo. Podemos assim traçar uma analogia a um sistema massa mola, onde a radiação faria o papel da mola. Desta forma o sistema oscilava, havendo pontos de maior (poços de potencial) e menor (picos de potencial) densidade.

É importante notar, que apesar deste fenômeno se dar em diferentes escalas, uma relação é preservada; dado que se demora metade do tempo para um fluido se comprimir num potencial de metade da escala, a frequência de oscilação do mesmo deve ser o dobro.

As flutuações de energia presentes nos fótons são maiores quando os mesmos são produzidos num dos extremos de potencial. As maiores oscilações se dão quando o "fluido" só teve tempo de ser contraído uma vez antes da recombinação. Como um modo que tenha o dobro do comprimento oscila duas vezes mais rápido, ele teria tempo de se comprimir e expandir antes da recombinação, e analogamente para modos com tamanhos ***n*** vezes maior que o "fundamental". Esses modos representam os picos seguintes nas oscilações de temperatura observadas na ***figura 3***.

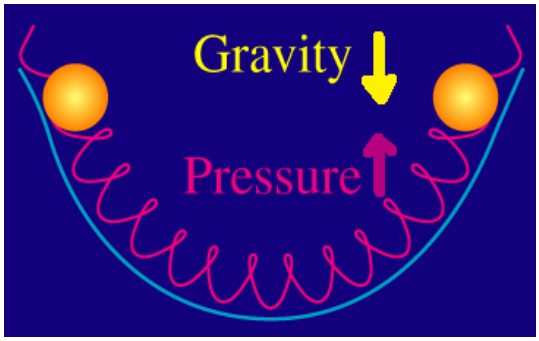

Figure 5: Forças agindo sob partículas

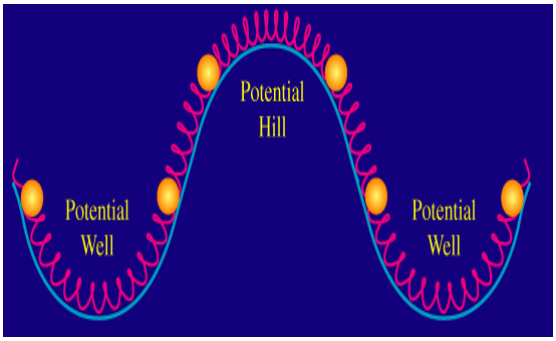

Figure 4: poços de potenciais formados no universo primordial

Anisotropia da CMB & Harmônicos Esféricos

É estranho falar em anisotropia e CMB quando já estipulamos a isotropia como uma das propriedades da mesma. Mas enquanto a temperatura pode ser isotrópica, em escalas suficientemente pequenas, há muitas flutuações desta temperatura, que por sua vez, são anisotrópicas.

Como as flutuações de temperatura são um escalar projetado numa superfície esférica 2D, é de bom senso utilizar harmônicos esféricos para descrever as mesmas.

$$T(\theta,\phi) = \sum_{l,|m|\leq l} a_{lm} Y_{lm}(\theta,\phi) = \sum a_{lm} P_{lm}(\cos\theta) e^{im\phi}$$

**vale notar que para pequenas áreas do céu é possível descrever com precisão a temperatura por series de Fourier*

Os primeiros termos são de interesse especial.

O termo $l = 0$ é a temperatura media

$$a_{00} = (2.725 \pm 0.002)K$$

Os termos $l = 1$ (termos de dipolo) são gerados pelo efeito Doppler do movimento em relação ao referencial cosmologico.

$$a_{10} = (3.358 \pm 0.02)\, mK, \qquad a_{1\pm1} = 0$$

Referencias

- Barbara Ryden, Introduction to Cosmology
- background.uchicago.edu/~whu
- https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_microwave_background
- http://spud.spa.umn.edu/~pryke/logbook/20000922/