

O elefante cósmico revisitado

Domingos Soares

Departamento de Física
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil

17 de janeiro de 2017

Resumo

A *Radiação de Fundo de Micro-ondas* é considerada como um dos pilares observacionais dos modelos teóricos da cosmologia relativista moderna. A questão do excesso de parâmetros livres requeridos para o seu ajuste a estes modelos, já apresentada em outro local, é revisitada.

1 Introdução

A *Radiação de Fundo Azul* (RFA) não é um fenômeno cósmico. Ela é observada durante o dia, sendo o resultado da dispersão seletiva da luz solar pela atmosfera terrestre. Neste sentido dizemos que a RFA é um fenômeno *local*. A RFA é extremamente uniforme através da abóbada celeste, se excluirmos as nuvens e a presença óbvia do Sol e, eventualmente, da Lua. Os astrônomos ópticos utilizam a RFA dos crepúsculos diários para a calibração dos dispositivos imageadores eletrônicos denominados CCDs (ver [1]), exatamente por causa da uniformidade observada nos crepúsculos. Eles registram imagens dos céus crepusculares — o primeiro ou o segundo — e as adotam como imagens padrão de brilho uniforme denominadas “campos planos”. Um estudo mais detalhado certamente revelaria a presença de minúsculas *anisotropias* nestes campos, as quais, por serem muito pequenas, certamente não prejudicariam a calibração.

A *Radiação de Fundo Escura* (RFE) é um fenômeno cósmico. Trata-se da tênue radiação existente na abóbada celeste no espaço existente entre as estrelas e as galáxias. A RFE é muito fraca e é responsável pela maior de todas as questões cosmológicas: *Por que o céu é escuro à noite?* (ver [2, 3]).

A *Radiação de Fundo de Micro-ondas* (RFM) é tratada no contexto do Modelo Padrão da Cosmologia (MPC) como um fenômeno cósmico e assim será tratada aqui. Existem, no entanto, pesquisadores que questionam esta postura e levantam a hipótese de a RFM ser, como a RFA, um fenômeno local. Tais hipóteses estão ilustradas na ref. [4] e no trabalho do físico francês Pierre-Marie Robitaille mencionado em [5]; veja também as opiniões do astrofísico britânico Fred Hoyle (1915-2001) e do físico francês Jean-Claude Pecker sobre a RFM na seção 3 de [6].

Independentemente de ser cósmica ou local, a RFM é de natureza térmica, correspondente à radiação emitida por um corpo com a temperatura baixíssima de 2,725 K (correspondente a -270 graus centígrados). Tal corpo possui o máximo de emissão na frequência de aproximadamente 160 GHz, na faixa milimétrica de comprimento de onda, ou seja, uma onda de rádio de pequeno comprimento de onda, daí o termo *micro-onda* em seu nome.

A próxima seção discute a influência de um número grande de parâmetros livres — no caso 6 — sobre os valores de uma função arbitrária qualquer. Isto serve de preparação para a discussão das anisotropias da RFM, que será feita na seção 3. A seção 4 apresenta as considerações finais.

2 O poder dos parâmetros livres

Vamos então a *A tromba do elefante cósmico* descrita na ref. [7]. Como vimos neste artigo, o Modelo Padrão da Cosmologia (MPC) possui pelo menos **6 parâmetros ajustáveis, i.e., livres**, os quais podem ser mudados, dentro de certas restrições, para o ajuste das observações das anisotropias da temperatura da Radiação de Fundo de Micro-ondas (o que será tratado na seção 3 abaixo).

Mas antes de “balançar novamente a tromba do elefante” (cf. visto em [7]), vamos ilustrar a variedade trazida por 6 parâmetros livres, a saber, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 e a_6 , no comportamento de uma função simples como a escrita abaixo.

$$f(\theta) = \text{sen}(a_1\theta) + \text{sen}(a_2\theta) + \text{sen}(a_3\theta) + \text{sen}(a_4\theta) + \text{sen}(a_5\theta) + \text{sen}(a_6\theta). \quad (1)$$

A figura 1 ilustra a função $f(\theta)$ com 3 conjuntos diferentes dos parâmetros a_i . Os três conjuntos foram extraídos aleatoriamente entre -10 e $+10$.

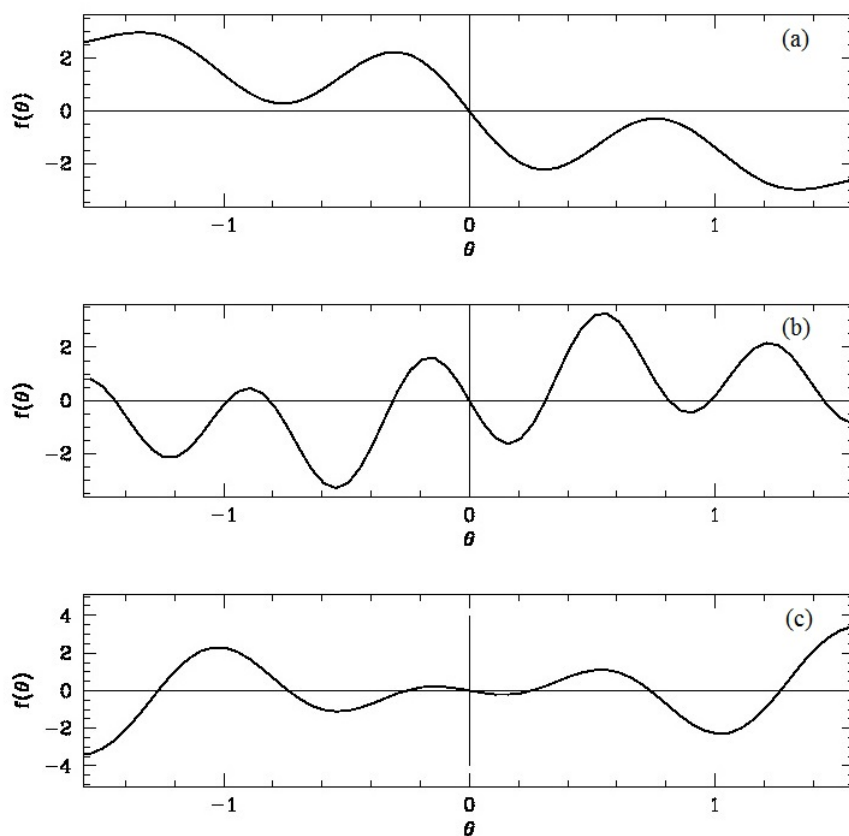


Figura 1: Os diagramas (a), (b) e (c) representam a função $f(\theta) = \text{sen}(a_1\theta) + \text{sen}(a_2\theta) + \text{sen}(a_3\theta) + \text{sen}(a_4\theta) + \text{sen}(a_5\theta) + \text{sen}(a_6\theta)$ para 3 conjuntos diferentes e aleatórios de a_i , tais que, $-10 \leq a_i \leq +10$. Note como a mesma função exibe comportamentos muito diferentes em (a), (b) e (c).

É interessante notar que a mesma função $f(\theta)$ apresenta uma diversidade enorme de valores para os diferentes conjuntos de parâmetros livres. No caso da figura 1 os parâmetros foram escolhidos aleatoriamente para ilustrar a diversidade obtida. No ajuste de um modelo teórico, entretanto, os parâmetros

livres são escolhidos com objetivos definidos pelo ajuste procurado, algumas vezes a escolha sofre restrições impostas pelas observações, todavia outras vezes os parâmetros são introduzidos de forma totalmente *ad hoc*, ou seja, eles são “inventados” para a consecução do ajuste desejado. Um exemplo claro deste tipo de escolha é a introdução de parâmetros que representam entidades totalmente desconhecidas — relacionadas às matéria e energia escuras — que ocorre no MPC.

3 As anisotropias da RFM

A revisitação de alguns aspectos das anisotropias da RFM apresentada a seguir utilizará muitos conceitos já apresentados na ref. [8]; antes de continuar é recomendável aprofundar-se um pouco mais sobre as anisotropias da RFM através da leitura deste texto. Outro texto que será utilizado na presente discussão é a nota de curso *Cosmic Microwave Background Anisotropy* (ver [9]) do físico finlandês Hannu Kurki-Suonio da Universidade de Helsinque. Não há necessidade de sua leitura prévia, mas recomenda-se acessá-lo sempre que for referido ao longo do presente texto.

As anisotropias da RFM são *flutuações* de temperatura em torno do valor médio $T_o = 2,73$ kelvins, o qual é a temperatura média da emissão térmica associada à RFM. As anisotropias ΔT , discutidas aqui, foram determinadas a partir das observações do observatório espacial WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*, NASA), que operou entre 2001 e 2010. Elas estão na faixa $-200 \mu\text{K} \leq \Delta T \leq +200 \mu\text{K}$ ou $-0,0002 \text{ K} \leq \Delta T \leq +0,0002 \text{ K}$. As anisotropias estão ilustradas na figura 2 que mostra um planisfério com as anisotropias cósmicas da RFM em toda a abóbada celeste; a escala de ΔT s está mostrada na barra colorida que aparece na figura.

Deve-se ressaltar que esta figura só mostra as **anisotropias da RFM** em torno de seu valor médio de $T_o = 2,73 \text{ K}$, que já foi medido com grande precisão por outra missão (o satélite COBE, cf. seção 2 de [8]). Além de T_o a imagem exclui também a anisotropia de **dipolo**, causada pelo movimento do observador relativamente ao fundo cósmico de radiação, quer dizer, o WMAP se movimenta em relação ao referencial da RFM e esta radiação apresenta-se mais “quente” (desviada para o azul) na direção do movimento do observador e mais “fria” (desviada para o vermelho) na direção contrária. Esta anisotropia não é, portanto, de natureza cósmica e é excluída do mapa apresentado na figura 2, que representa apenas as anisotropias cósmicas, as

quais devem ser explicadas pelo MPC. A anisotropia de dipolo é cerca de 10 vezes maior do que a anisotropia cósmica máxima, i.e., $\Delta T_{dipolo} \approx 0,003$ K.

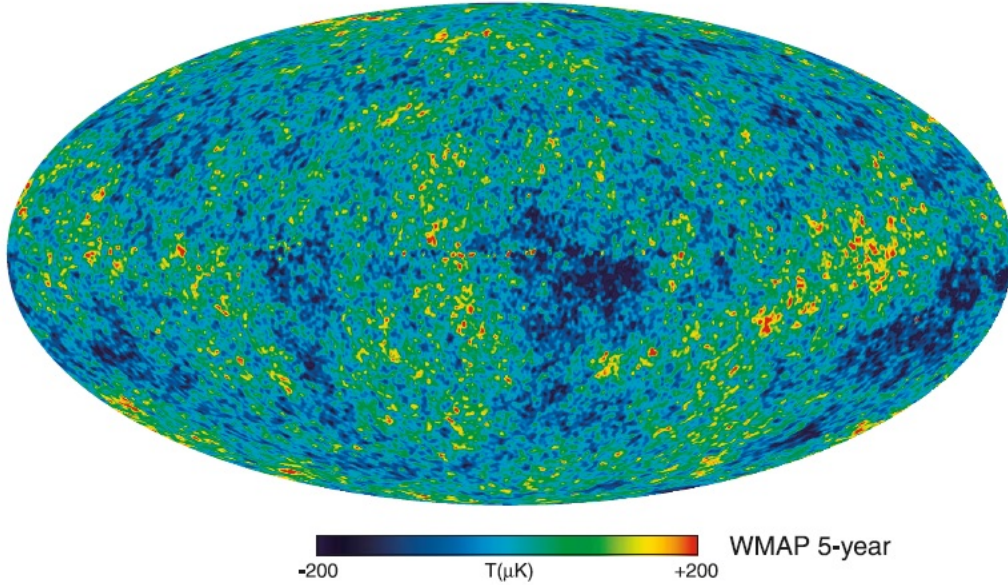


Figura 2: Planisfério mostrando as observações das anisotropias da RFM em toda a abóbada celeste após os 5 anos de atividades observacionais do WMAP. A barra codificada em cores mostra a escala de variação de temperatura, a qual vai de -200 microkelvin a $+200$ microkelvin (1 microkelvin = 1×10^{-6} kelvin). A imagem apresenta as anisotropias residuais da RFM sem as contribuições da temperatura média $T_o = 2,73$ K e da anisotropia de dipolo.

As anisotropias da RFM são usualmente descritas por uma ferramenta estatística muito poderosa denominada “**série de harmônicos esféricos**”. Os harmônicos esféricos são funções matemáticas especialmente úteis para se descrever de forma quantitativa uma distribuição de valores em duas dimensões, como é o caso aqui. As anisotropias da RFM se distribuem na superfície esférica da abóbada celeste, que pode ser completamente definida por duas variáveis angulares. A figura 3 mostra alguns harmônicos esféricos (figura 10 de [9]). O mapa de anisotropias da figura 2 é representado por uma série de harmônicos esféricos Y_{lm} (ver eq. 1 de [8]):

$$T(\theta, \phi) = \sum_{lm} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi), \quad (2)$$

onde $l = 0$ corresponde à temperatura média da RFM e $l = 1$ corresponde à anisotropia de dipolo. Os coeficientes a_{lm} quantificam a contribuição de cada harmônico esférico para se obter o ajuste à imagem da figura 2. Alguns harmônicos esféricos, representados como planisférios, estão na figura 3. Cada planisfério representa a superfície esférica da abóbada celeste.

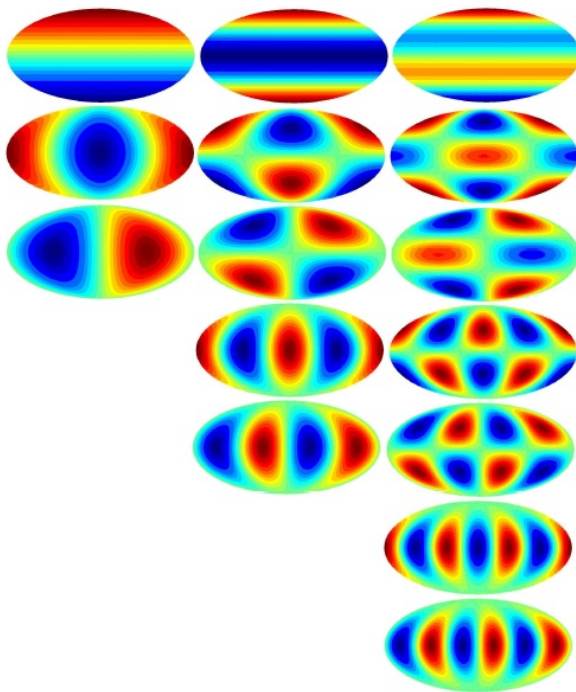


Figura 3: Harmônicos esféricos correspondentes aos três multipolos mais baixos $l = 1, 2, 3$. Os planisférios da coluna à esquerda representam os harmônicos esféricos de $l = 1$ e são usados para o ajuste da anisotropia de dipolo (para mais detalhes ver a figura 10 de [9]).

A representação gráfica da série de harmônicos esféricos é dada pelo chamado **espectro de potência** das anisotropias da RFM definido como o valor médio do quadrado dos coeficientes a_{lm} da série dos harmônicos esféricos (eq.

2):

$$C_l \equiv \langle |a_{lm}|^2 \rangle. \quad (3)$$

O termo **potência** refere-se ao **vigor** da contribuição de cada harmônico esférico para o ajuste das observações das anisotropias. A função C_l contém toda a informação estatística sobre as anisotropias de temperatura da RFM. Ele está mostrado na figura 4.

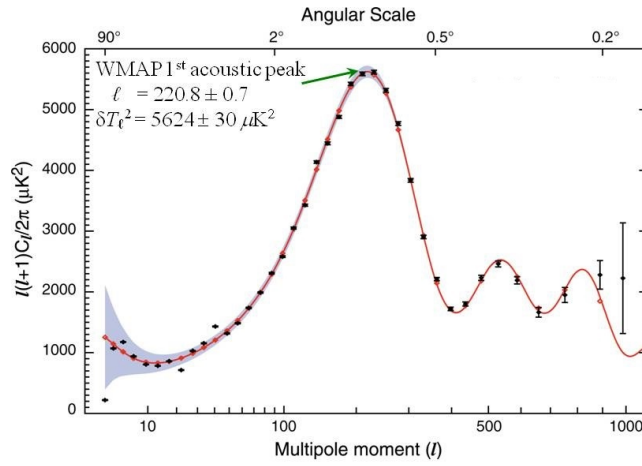


Figura 4: Espectro de potência das anisotropias da RFM observadas pelo WMAP. Os pontos com as barras de erro representam os multipolos (a partir de $l = 2$) da série de harmônicos esféricos ajustada às observações mostradas na figura 2 (ver também a figura 2 de [8]). A curva vermelha é o ajuste obtido com o MPC (modelo Λ CDM; o significado desta sigla está explicado no primeiro parágrafo de [7]).

A análise das anisotropias da RFM consiste em calcular a partir da RFM observada o espectro de potência angular, como o mostrado acima, e compará-lo com a função C_l predita pelos processos físicos do MPC.

A soma na eq. 2 inicia-se em $l = 2$ e vai até um dado l_{max} , o qual é ditado pela resolução dos dados da RFM observada.

4 Considerações finais

O ajuste do MPC ao espectro de potência da RFM é feito através de vários processos físicos que envolvem 6, 7 ou mais parâmetros livres (detalhes na seção 9.11 de [9]). Como exemplificado na seção 1, um número elevado de parâmetros livres permite a obtenção de uma variedade enorme de resultados teóricos, o que torna irrelevante, do ponto de vista de validação de uma teoria, o fato de se ajustar um modelo a um conjunto de observações. É oportuno retornar aos comentários do físico teórico inglês Freeman Dyson citado em [7].

O primeiro parágrafo da seção 9.11 de [9] chama a atenção para uma complicação adicional no ajuste teórico da função C_l : a **degenerescência** na determinação dos vários parâmetros. Leiamos:

“Let us finally consider the total effect of the various cosmological parameters on the C_l spectrum. The C_l provides the most important single observational data set for determining (or constraining) cosmological parameters, since it has a rich structure which we can measure with an accuracy that other cosmological observations cannot match, and because it depends on so many different cosmological parameters in many ways. The latter is both a strength and weakness: the number of cosmological parameters we can determine is large, but on the other hand, some feature in C_l may be caused by more than one parameter, so that we may only be able to constrain some combination of such parameters, not the parameters individually. We say that such parameters are degenerate in the CMB (Cosmic Microwave Background) data. Other cosmological observations are then needed to break such degeneracies.”

“Consideremos finalmente o efeito total dos vários parâmetros cosmológicos no espectro de C_l . O C_l fornece o mais importante e único conjunto de dados observacionais para se determinar (ou se restringir) os parâmetros cosmológicos, já que ele possui uma rica estrutura a qual podemos medir com uma precisão que outras observações cosmológicas não podem rivalizar, e porque **ele depende de muitas maneiras de muitos parâmetros diferentes**. A última afirmação é tanto um ponto forte quanto

uma fraqueza: o número de parâmetros que podemos determinar é grande, mas por outro lado, alguma característica em C_l pode ser causada por mais de um parâmetro, de tal forma que podemos somente restringir uma combinação de tais parâmetros, não os parâmetros individualmente. Dizemos que tais parâmetros **são degenerados nos dados da RFM** (Radiação de Fundo de Micro-ondas). Outras observações cosmológicas são então necessárias para se quebrar tais degenerescências.”

Agradecimento – A figura 1 foi confeccionada em um dos computadores do Instituto Astronômico Kapteyn, Groningen, Holanda, sob os auspícios do Prof. Reynier Peletier.

Referências

- [1] D. Soares, *O fabuloso CCD* in *O Reino das Galáxias*,
<https://www.researchgate.net/publication/337719531>, pp. 19-22 (2021).
- [2] D. Soares, *A escuridão da noite* in *O Reino das Galáxias*,
<https://www.researchgate.net/publication/337719531>, pp. 37-42 (2021).
- [3] D. Soares, M. Neves *A escuridão do espaço profundo*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/esprof/esprof.htm> (2016).
- [4] D. Soares, *Observational tests of the microwave background radiation*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/mbr/otmbr.pdf> (2007).
- [5] D. Soares, *COSMOS:19ago09*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/cosmos/09/cosmos16.htm> (2009).
- [6] D. Soares, *Sandage versus Hubble on the reality of the expanding universe*,
<https://arxiv.org/abs/physics/0605098> (2006).
- [7] D. Soares, *A tromba do elefante cósmico*,
<http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ensino/elefnt.htm> (2014).
- [8] D. Soares, *Espectro de potência da Radiação de Fundo de Micro-ondas* in *Tópicos em cosmologia relativista*,
<https://www.researchgate.net/publication/338842995>, pp. 81-88 (2020).

- [9] H. Kurki-Suonio , *Cosmic Microwave Background Anisotropy*,
<https://www.mv.helsinki.fi/home/hkurkisu/Cosm9.pdf> (2019).