

Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas

GABRIELA ANTUNES MARQUES*

Universidade de Brasília

Resumo

A detecção da radiação cósmica de fundo foi um dos marcos da era da Cosmologia de precisão. A partir de medidas de suas propriedades, pode-se extrair informações sobre as características do Universo ainda jovem e, em conjunto com outros dados, estabelecer o cenário cosmológico atual, conhecido como Λ CDM. Este artigo é destinado a discorrer sobre as principais propriedades cosmológicas desta observável além de expor algumas questões ainda em aberto.

Palavras-chave: Cosmologia- Radiação Cósmica de Fundo- Anisotropias Secundárias

I. RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICRO-ONDAS

Entre 1930 a 1950, diversas teorias foram propostas a fim de descrever a evolução termodinâmica do Universo ([1], [2], [3], por exemplo). Entre elas, Alpher e Herman em 1948, propuseram que o Universo primordial deveria estar permeado por uma radiação que esteve em equilíbrio térmico com a matéria [4]. Em meados da década de 50, George Gamow e colaboradores, incluindo Alpher e Herman, formularam uma série de estimativas da *temperatura de fundo* (termo utilizado pelos autores para se referir à temperatura desta radiação) que variavam de 3 a 50 Kelvin [5]. Na década de 40, medidas de moléculas

de cianogênio do meio interestelar relataram evidências de um equilíbrio em uma radiação térmica em torno de 2,3 K¹. No entanto, somente em 1965, Arnold Penzias e Robert Wilson, utilizando uma antena destinada a testes com satélites de telecomunicações do laboratório *Bell Telephone Laboratories*, detectaram um excesso de sinal de origem desconhecida em todas as direções do céu [8]. Na mesma época, Dicke em colaboração com Peebles, Roll e Wilkinson, tentavam construir um experimento que realizasse uma medida da radiação proveniente do Universo primordial e assim, eles forneceram a interpretação cosmológica correta do sinal encontrado por Penzias e Wilson [9]. Para uma discussão detalhada sobre a história da detecção da RCF,

*Aluna de doutorado do Observatório Nacional. Fez graduação em Física na UnB. Atualmente trabalha com foco em efeito de lentes gravitacionais fracas na RCF, propriedades fundamentais da RCF e correlação com dados de estrutura em grande escala. Email: gabrielamarques@on.br

¹Trabalhos por exemplo do [6] e [7]

veja [11].

Desde a primeira detecção desta radiação, denominada então como radiação cósmica de fundo (RCF), diversos instrumentos foram projetados com a finalidade de extrair suas características. Uma delas, foi o espectro térmico estimado por Roll e Wilkinson, cujo ajuste é próximo a uma curva de um corpo negro [10]. Este resultado, também confirmado por outros experimentos, mostra que temperatura média da RCF é igual a $2,72548 \text{ K} \pm 0,00057 \text{ K}$ [12, 13] e pode ser visualizado na figura 1. Esta propriedade é um dos pilares do modelo cosmológico padrão pois favorece o cenário em que o Universo, quando jovem, era quente e denso de modo a permitir que radiação e matéria estivessem em equilíbrio térmico no plasma primordial.

Ao passo que o Universo sofre expansão adiabática e em uma temperatura de $\sim 3000\text{K}$, os fótons da RCF se desacoplaram da matéria e se propagaram livremente. A região em que ocorre a última interação entre matéria e radiação, antes do desacoplamento, é denominada como **última superfície de espalhamento** (USE). Desde então, a frequência destes fótons primordiais é alterada (hoje possui máximo de intensidade localizado na faixa de micro-ondas) e a temperatura do corpo negro diminui.

Após a detecção da RCF, diversas questões foram levantadas como por exemplo, a necessidade de medir pequenas flutuações de temperatura presentes na radiação. Esta detecção seria um indício da existência de perturbações primordiais originadas (possivelmente) na era inflacionária, que por sua vez são fundamentais para entender o mecanismo de formação de estruturas. Em 1967, variações na temperatura correspondente ao dipolo cinemático foram confirmadas com uma amplitude de

$\Delta T/T \sim 10^{-3}$ pelo experimento projetado por Partridge e Wilkinson [33] e mais tarde, flutuações da ordem de $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ pelo experimento *Diferencial Microwave Radiometer*, a bordo do satélite COBE [14]. As pequenas flutuações de temperatura na RCF, denominadas anisotropias primárias por terem origem antes da USE, correspondem a pequenas variações na densidade e na velocidade do plasma primordial, de forma que pode-se conhecer diversas propriedades cosmológicas, a partir da análise destes dados (ver por exemplo, [15]).

II. INFORMAÇÕES COSMOLÓGICAS A PARTIR DAS ANISOTROPIAS PRIMÁRIAS

Uma vez que as flutuações de temperatura $\frac{\Delta T}{T}$ são definidas na esfera celeste, elas podem ser representadas em termos da expansão dos harmônicos esféricos:

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi), \quad (1)$$

onde os a_{lm} são os coeficientes da expansão e $Y_{lm}(\theta, \phi)$ são os harmônicos esféricos. O momento m descreve a orientação angular das flutuações, enquanto que o multipolo l está associado a escala angular. O monopolo, $l = 0$, corresponde ao valor médio da temperatura da RCF ($T = 2,725 \text{ K}$), enquanto que o termo de dipolo ($l = 1$), trata-se efeito do Doppler devido ao nosso movimento em relação ao referencial da RCF, isto é, uma propriedade cinemática [17]. Este efeito possui amplitude igual a $3,335 \pm 0,008 \text{ mK}$ [20].

Assumindo isotropia estatística, as propriedades das flutuações de temperatura, podem ser descritas no espaço harmônico pelo espectro de potência C_l onde,

$$\langle a_{lm}^* a_{l'm'} \rangle = \delta_{ll'} \delta_{mm'} C_l, \quad (2)$$

em que os termos em colchetes angulados representam uma média angular calculada para todo o céu e δ é a Função Delta de Dirac.

Estimamos o espectro de potência C_l utilizando então:

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2. \quad (3)$$

A curva que relaciona o espectro de potência C_l com os valores dos momentos de multipolo l , possui picos ligados a quantidades fundamentais sobre a evolução do Universo, conhecidos como parâmetros cosmológicos. Desta forma, pode-se confrontar a predição teórica com a detecção em diferentes escalas angulares do céu e assim, restringir tais parâmetros e o modelo cosmológico que melhor descreve tal cenário [23]. Os dados do espectro de potência recentemente obtidos pelo satélite Planck, juntamente com a curva de melhor ajuste está representado na figura 2.

De acordo com o modelo de melhor ajuste, em grandes escalas angulares, isto é, $l \lesssim 50$, o comportamento dos C_l é dominado pelas variações do potencial gravitacional primordial devido à flutuações na densidade, conhecido como efeito Sachs-Wolfe (SW). A origem das flutuações de temperatura em pequenas escalas angulares ($l \gtrsim 50$) deve-se a interação fóton-bárion no plasma primordial, denominada de **oscilações acústicas**, onde os picos representados no espectro de potência estão associados aos modos harmônicos desta oscilação. O primeiro pico, por exemplo, em ~ 1 , representa o harmônico fundamental e pode ser utilizado para aferir a curvatura do Universo (para uma revisão detalhada ver: [26] e [18]).

A figura 3 mostra a combinação de curvas de contorno de confiança em uma variedade de modelos de energia escura a partir

de parâmetros cosmológicos estimados por diferentes observáveis, incluindo por medidas da RCF do satélite Planck. Dentre os cenários expostos, o modelo Λ CDM (do inglês, Λ *Cold Dark Matter*), que considera a existência da componente de energia escura Λ e matéria escura fria, é o que apresenta melhor concordância com os dados observacionais, motivo pelo qual o mesmo é chamado também de modelo padrão. Maiores detalhes sobre modelos com a componente de energia escura e as motivações observacionais em [51], [19].

I. Não-Gaussianidades das Anisotropias Primárias da RCF

As observações das flutuações da RCF refletem perturbações de densidade geradas ainda na época de inflação cosmológica. Tal período, pode ser descrito quando a densidade de energia do Universo é dominada por uma densidade de energia de vácuo associada com o potencial de um campo escalar, chamado o campo inflatón. Como as perturbações cosmológicas primordiais possuem baixa amplitude, seu mecanismo de geração e evolução durante a inflação tem sido estudado dentro da teoria de perturbação linear. Nesta abordagem, as perturbações de densidades primordiais são Gaussianas, em outras palavras, as suas componentes de Fourier não estão correlacionados e tem fases aleatórias. Espera-se então neste cenário, que as flutuações de temperatura da RCF tenham distribuição aproximadamente gaussiana [28].

Testes envolvendo estimadores capazes de detectar sinais não-gaussianos na RCF são importantes por diversos motivos. Um deles é verificar se o espectro de potência contém todas as informações estatísticas para caracterizar este campo ou se há também in-

formação em correlações de ordens superiores. Além disto, através de medidas de não-gaussianidades (NG), pode-se detectar contaminantes residuais, efeitos secundários, erros sistemáticos instrumentais ou causados pelo processamento dos dados e desta forma, remover tais efeitos [27]. É possível ainda, através da busca por sinais NG na distribuição das flutuações de temperatura da RCF, restringir alguns cenários propostos para explicar o mecanismo de geração de perturbações cosmológicas.

A idéia básica do modelo de inflação foi inicialmente proposta na década de 80, a fim de solucionar alguns problemas do modelo do *Big Bang*, tais como a planaridade, o problema do horizonte e dos monopólos ². De acordo com o modelo de concordância cosmológica atual, as anisotropias primárias da RCF são causadas devido à inhomogeneidades primordiais do Universo. Tais perturbações, geradas no período de inflação, se tornaram as sementes para formação das estruturas observadas atualmente [34]. Os dados recentes do satélite Planck concordam que estas anisotropias primárias têm uma distribuição aproximadamente gaussiana [35]. No entanto, há diferentes cenários propostos que gerariam diferentes tipos e níveis de NG, inclusive em limites instrumentais ainda não alcançáveis [36, 37, 38]. Evidências da existência de NG são, então, uma forma de testar e restringir tais classes de modelos.

Vários métodos de análise estatística foram empregados, a fim de detectar NG primordiais na distribuição da RCF (por exemplo, [39, 40, 41, 42, 43]). Entre eles, estão as correlações de alta ordem no espaço dos harmônicos, denominados como biespectro

(correlação de três pontos) ou ainda o triespectro (correlação de quatro pontos).

O biespectro \mathcal{B}_Φ é definido em termos das perturbações no potencial gravitacional primordial $\Phi(\mathbf{x})$. Considerando o regime linear, o potencial pode ser escrito como a combinação de um termo gaussiano ϕ_L mais uma contribuição não-gaussiana ϕ_{NL} , tal que

$$\Phi(\mathbf{x}) = \phi_L(\mathbf{x}) + \phi_{NL}(\mathbf{x}) = \phi_L(\mathbf{x}) + f_{NL}[\phi_L^2(\mathbf{x}) + \langle \phi_L^2(\mathbf{x}) \rangle], \quad (4)$$

onde f_{NL} é um parâmetro adimensional e representa a amplitude da contribuição NG. Para o caso das flutuações gaussianas, o f_{NL} esperado seria igual a 0. As flutuações de temperatura da RCF estão diretamente relacionadas a este potencial, de forma que a correlação de três-pontos destas flutuações podem ser expressas em termos de Φ [35], onde

$$\langle \Phi(\mathbf{k}_1)\Phi(\mathbf{k}_2)\Phi(\mathbf{k}_3) \rangle = (2\pi)^3 \mathcal{B}_\Phi(k_1, k_2, k_3) \delta^{(3)}(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3), \quad (5)$$

em que $\Phi_{\mathbf{k}}$ é a transformada de Fourier do potencial.

O biespectro \mathcal{B}_Φ pode ser escrito como

$$\mathcal{B}_\Phi(k_1, k_2, k_3) = f_{NL} F(k_1, k_2, k_3), \quad (6)$$

onde a função $F(k_1, k_2, k_3)$ é denominada *forma do biespectro*. Os parâmetros f_{NL} podem ser restringidos a partir de observações da RCF e calculados teoricamente para diferentes modelos do universo primordial.

A partir da definição delta de Dirac da equação (5), se tem a condição para os vetores de onda no espaço de Fourier

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3 = 0. \quad (7)$$

²Para maiores detalhes ver [29, 32, 30, 31])

Há então, diferentes configurações triangulares para os vetores de onda. Consequentemente, cada uma delas está relacionada a um tipo específico de NG e por sua vez, a distintos mecanismos físicos do Universo primordial. Há três tipos de configurações consideradas com maior recorrência na literatura, sendo elas, local (f_{NL}^{LOCAL}), ortogonal (f_{NL}^{ORTO}) e equilateral (f_{NL}^{EQUI}) (maiores detalhes podem ser encontrados em [44]). Resultados recentes encontrados pelo satélite Planck restringem os valores a: $f_{NL}^{LOCAL} = 0,8 \pm 5,0$, $f_{NL}^{ORTO} = -26 \pm 21$ e $f_{NL}^{EQUI} = -4 \pm 43$, onde as incertezas indicam 1σ de confiança [35].

Estes valores ainda admitem uma grande classe de modelos. Portanto, é necessário restringir NG primordiais de maneira cada vez mais precisa e utilizando outros estimadores, pois tratam-se de sinais de amplitude extremamente pequena. Além disto, outros mecanismos secundários podem interferir em tal detecção, ocultando as pequenas NG primordiais.

II. Anisotropias da Polarização

Perturbações primordiais resultam não apenas em variações na temperatura, mas geram também polarização em pequenas frações no campo da RCF [45]. Através de sua determinação, é possível extrair informações cosmológicas adicionais como por exemplo, melhorar as estimativas dos parâmetros cosmológicos e restringir alguns modelos inflacionários. Isto é possível porque o modo e intensidade de polarização está diretamente ligado ao tipo de perturbação que a originou [46].

Características da radiação polarizada podem ser descritas pelos parâmetros de Stokes, ou podem serem decompostas nas componen-

tes E (irrotacional) e B (divergente nulo). A principal vantagem da utilização das componentes E e B está na possibilidade de expandilos em harmônicos esféricos e, desta forma, fazer análises da polarização através dos seus espectros de potência e correlações cruzadas [18]. Assim, o modo EE, ou seja, a correlação desta componente, resulta em seu espectro de potência C_l^{EE} de forma

$$\langle E_{lm}^* E_{l'm'} \rangle = \delta_{ll'} \delta_{mm'} C_l^{EE}, \quad (8)$$

e de maneira análoga para o modo de polarização BB, o espectro de potência C_l^{BB} satisfaz

$$\langle B_{lm}^* B_{l'm'} \rangle = \delta_{ll'} \delta_{mm'} C_l^{BB}. \quad (9)$$

A primeira detecção do modo EE foi realizada em uma pequena região do céu pelo experimento DASI (do inglês, *Degree Angular Scale Interferometer*) [48]. No entanto, ainda não há medidas do modo BB devido a processos primordiais. A existência do modo EE, corrobora com perturbações escalares ou tensoriais no fluido primordial, uma vez que ambos tipos gerariam tal assinatura. A detecção do modo BB indicaria perturbações do tipo tensorial e seria uma medida indireta de ondas gravitacionais primordiais [18]. Há ainda, outras classes de modelos inflacionários que produziriam tais modos.

Além da amplitude do modo BB ser muito menor que a do modo EE, há outros mecanismos físicos que dificultam sua possível detecção, pois também produzem este tipo de polarização. Um destes, pode ser associado a *foregrounds* (contaminações da Galáxia), assim como também ao efeito de lentes gravitacionais fracas (LGF). Em 2014, medidas de polarização da RCF através do experimento BICEP2 (do inglês, *Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization*) revelaram

a possibilidade da detecção do modo BB de polarização primordial [47]. No entanto, foi verificado posteriormente que tal sinal foi produzido pela contaminação de poeira cósmica corroborando então, com a necessidade de um domínio completo dos *foregrounds* para fazer Cosmologia observacional de precisão [49].

A figura 4 mostra o espectro de potência para cada modo de polarização da RCF, comparado com o espectro produzido devido ao LGF e ao da temperatura da RCF. Nota-se que, principalmente em grandes multipolos ($l > 200$), o sinal gerado por LGF interfere na possibilidade de detecção do modo BB da polarização da RCF.

III. ANISOTROPIAS SECUNDÁRIAS

Durante a propagação dos fótons ocorrem diversos mecanismos físicos que também geram flutuações de temperatura nos mapas da RCF devido à estruturas (galáxias, estrelas, poeira, etc) que estão ao longo do caminho. Tais flutuações são decorrentes de processos de interações não-primordiais, isto é, originadas após a USE e por isto são denominadas de **anisotropias secundárias**. Um destes processos acontece quando os fótons atravessam o interior de aglomerados de galáxias e sofrem espalhamento Compton inverso por elétrons energéticos do meio. Tal efeito foi descrito primeiramente por Sunyaev e Zel'dovich [21], motivo pelo qual é denominado como efeito Sunyaev-Zel'dovich (efeito SZ). Uma das principais propriedades deste efeito é gerar distorções no espectro térmico da RCF. Quando os aglomerados possuem movimento em relação aos fótons, a distorção espectral da RCF gera uma assinatura adicional causada por este efeito cinético (efeito Doppler), denomi-

nado efeito SZ cinemático, enquanto que as distorções causadas apenas pela interação entre os fótons e elétrons do meio, produzem o efeito SZ térmico.

Causado predominantemente por estruturas em grande escala, o efeito Sachs-Wolfe integrado (SWI) é uma anisotropia secundária gerada pela interação entre os fótons da RCF com campos gravitacionais que variam com o tempo ao longo da trajetória. O efeito SWI está diretamente ligado ao crescimento de estruturas onde a energia escura é predominante [51]. O espectro de potência da RCF é sensível a este efeito principalmente para pequenos valores de l , porém, o espectro de corpo negro não é alterado [22]. A principal forma de detecção de SWI é através de correlações cruzadas com traçadores de matéria.

Os fótons da RCF, provenientes da USE, sofrem deflexões devido a variações do potencial gravitacional ao longo da trajetória, isto é, o chamado efeito de lentes gravitacionais fracas (LGF). Uma das principais consequências de LGF nos mapas da RCF, é a distorção do padrão espacial das anisotropias primárias de temperatura e polarização e por consequência mudança no espectro de potência e introduzir sinais não-gaussianos. Tal efeito está correlacionado com o efeito SWI uma vez que ambos possuem origem gravitacional, no entanto, com mecanismos físicos (e escalas angulares) distintos. Apesar de alterar as propriedades da RCF, o efeito de LGF está diretamente ligado à distribuição de matéria do Universo, podendo então, ser utilizado como ferramenta para estudo de informações cosmológicas [52].

Além das anisotropias secundárias, há outros mecanismos de emissão nas mesmas frequências da RCF provenientes da nossa Galáxia ou do meio extragaláctico, que tam-

bém contaminam o sinal das anisotropias primárias. O estudo destas emissões galácticas, denominadas *foregrounds*, são essenciais para separar o sinal da RCF, além de carregarem consigo importantes informações do meio interestelar, donde se originam.

IV. CONCLUSÃO

Observações da RCF fornecem informações fundamentais sobre a história do Universo, uma vez que é originada quando ele era 10^5 vezes mais jovem e cerca de 10^9 vezes mais denso. Através do seu espectro e propriedades das anisotropias de temperaturas e polarização, torna-se possível validar diferentes classes de modelos cosmológicos. Apesar do modelo padrão (Λ CDM) melhor se ajustar aos dados observacionais, ainda há uma série de questões em aberto que podem ser solucionadas com detecções cada vez mais sensíveis da RCF, como por exemplo:

- Entender melhor a natureza do setor escuro, uma vez que através dos dados da RCF, em combinação com outras observáveis (Supernovas, oscilações acústicas bariônicas, por exemplo), é possível restringir e obter maiores informações sobre os ingredientes que compõem o Universo.

cas bariônicas, por exemplo), é possível restringir e obter maiores informações sobre os ingredientes que compõem o Universo.

- O período inflacionário ainda permanece um paradigma, de forma que a detecção do modo BB de polarização da RCF, poderia validar e romper a degenerescência de diferentes classes de modelos inflacionários. Além disto, testes com estimadores de NG com dados cada vez mais precisos, contribuem para caracterizar as perturbações primordiais.
- Há ainda, limitações astrofísicas e observacionais para obtenção do mapa da RCF, como a contaminação da nossa Galáxia e anisotropias secundárias. Torna-se necessário então, um estudo mais aprofundado de tais contaminantes para que se possa subtrai-las do sinal da RCFM sem corromper suas informações cosmológicas. Além disso, como tratam-se de sinais provenientes ao longo da linha de visada, é possível ainda extrair informações cosmológicas a partir do estudos destas componentes.

REFERÊNCIAS

- [1] Tolman, C., *Effect of inhomogeneity on cosmological models*, Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 20, 3, 169, 1934
- [2] Gamow, G., *Expanding universe and the origin of elements*, Physical Review, 70, 7-8, 572, 1946
- [3] Dicke, R. H., *The measurement of thermal radiation at microwave frequencies*, Review of Scientific Instruments, 17, 7, 268–275, 1946
- [4] Alpher, A. and Herman, R., *Evolution of the Universe*, Nature, 162, 774–775, 1948
- [5] Gamow, G., *The physics of the expanding universe*, Vistas in Astronomy, 2, 1726–1732, 1956
- [6] McKellar, A., *Evidence for the molecular origin of some hitherto unidentified interstellar lines*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 187–192, 1940
- [7] Adams, W. S., *Some Results with the COUDÉ Spectrograph of the Mount Wilson Observatory*, The Astrophysical Journal, 93, 11, 1941
- [8] Penzias, A. A, Wilson, R. W., *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.*, The Astrophysical Journal, 142, 419–421, 1965
- [9] Dicke, H., Peebles, P. J., Roll, P. G, Wilkinson, D., *Cosmic Black-Body Radiation*, The Astrophysical Journal, 142, 414–419, 1965
- [10] Roll, P., Wilkinson, D., *Cosmic background radiation at 3.2 cm-support for cosmic black-body radiation*, Physical Review Letters, 16, 10, 405, 1966
- [11] Peebles, P.J., Page, L., Partridge, R., *Book Review: Finding the Big Bang*, Journal for the History of Astronomy, 41, 137–138, 2010
- [12] Fixsen, D., *The temperature of the cosmic microwave background*, The Astrophysical Journal, 707, 2, 916, 2009
- [13] Mather, J. *et al.*, *Measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COBE FIRAS instrument*, The Astrophysical Journal, 420, 439–444, 1994
- [14] Smoot, G., *et al*, *Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps*, The Astrophysical Journal, 396, L1–L5, 1992
- [15] Sugiyama, N., *Cosmic background anisotropies in CDM cosmology*, arXiv preprint astro-ph/9412025, 1994
- [16] Smoot, G., *Recurso Online*, <http://cosmos.lbl.gov/cobehome.html#firas>, 2007, Acesso em: 2015-06-20

- [17] Ryden, B., *Introduction to cosmology*, 1, 191-199, 2003
- [18] Hu, W., Dodelson, S., *Cosmic microwave background anisotropies*, arXiv preprint astro-ph/0110414, 2001
- [19] Yoo, J., Watanabe, Y., *Theoretical models of dark energy*, International Journal of Modern Physics D, 21, 12, 1230002, 2012
- [20] Scott, D., Smoot, G., *Cosmic microwave background mini-review*, arXiv preprint arXiv:1005.0555, 2010
- [21] Zeldovich, Y., Sunyaev, R., *The interaction of matter and radiation in a hot-model universe*, Astrophysics and Space Science, 4, 3, 301–316, 1969
- [22] Ade, P., *et al.*, *Planck 2013 results. XIX. The integrated Sachs-Wolfe effect*, Astronomy & Astrophysics, 571, A19, 2014
- [23] Kosowsky, A., *The cosmic microwave background*, arXiv preprint astro-ph/0102402, 2001
- [24] Ade, P., *et al.*, *Planck 2013 results. XVI. Cosmological parameters*, Astronomy & Astrophysics, 571, A16, 2014
- [25] Aubourg, É., *et al.*, *Cosmological implications of baryon acoustic oscillation (BAO) measurements*, arXiv preprint arXiv:1411.1074, 2014
- [26] Liddle, A., *An introduction to modern cosmology*, 2015, 75-83, John Wiley & Sons
- [27] Vielva, P., Martínez-G., *Detection of non-gaussianity in the Wilkinson microwave anisotropy probe first-year data using spherical wavelets*, The Astrophysical Journal, 609, 1, 22, 2004
- [28] Bartolo, N., *et al.*, *Non-Gaussianity from inflation: theory and observations*, Physics Reports, 402, 3, 103–266, 2004
- [29] Guth, A., *Inflationary universe: A possible solution to the horizon and flatness problems*, Physical Review D, 23, 2, 347, 1981
- [30] Linde, A., *A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems*, Physics Letters B, 108, 6, 389–393, 1982
- [31] Sato, K., *First-order phase transition of a vacuum and the expansion of the Universe*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 195, 3, 467–479, 1981
- [32] Matthias B., Schneider, P., *Weak gravitational lensing*, Physics Reports, 340, 4–5, 291 - 472, 2001

- [33] Wilkinson, D., Partridge, R., *Large scale density inhomogeneities in the universe*, Nature Publishing Group, 1967
- [34] Modest, H., *et al.*, *Scale-dependent non-Gaussianities in the CMB data identified with Minkowski functionals and scaling indices*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 428, 1, 551–562, 2013
- [35] Ade, P., *et al.*, *Planck 2013 results. XXIV. Constraints on primordial non-Gaussianity*, Astronomy & Astrophysics, 571, A24, 2014
- [36] Verde, L., *et al.*, *Large-scale structure, the cosmic microwave background and primordial non-Gaussianity*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 313, 1, 141–147, 2000
- [37] Bernardeau, F., Uzan, J., *Inflationary models inducing non-Gaussian metric fluctuations*, Physical Review D, 67, 12, 121301, 2003
- [38] Chen, X., *et al.*, *Large non-Gaussianities in single-field inflation*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2007, 06, 023, 2007
- [39] Bernui, A., *et al.*, *Deviation from Gaussianity in the cosmic microwave background temperature fluctuations*, EPL (Europhysics Letters), 78, 1, 19001, 2007
- [40] Chiang, L., *et al.*, *Non-gaussianity of the derived maps from the first-year wilkinson microwave anisotropy probe data*, The Astrophysical Journal Letters, 590, 2, L65, 2003
- [41] McEwen, J., *et al.*, *A high-significance detection of non-Gaussianity in the WMAP 5-yr data using directional spherical wavelets*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 388, 2, 659–662, 2008
- [42] Yadav, A., Komatsu, E., Wandelt, B., *Fast estimator of primordial non-Gaussianity from temperature and polarization anisotropies in the cosmic microwave background*, The Astrophysical Journal, 664, 2, 680, 2007
- [43] Dalal, N., *et al.*, *Imprints of primordial non-Gaussianities on large-scale structure: Scale-dependent bias and abundance of virialized objects*, Physical Review D, 77, 12, 123514, 2008
- [44] Bartolo, N., Matarrese, S., Riotto, A., *Non-Gaussianity and the cosmic microwave background anisotropies*, Advances in Astronomy, 2010,
- [45] Cabella, P., Kamionkowski, M., *Theory of cosmic microwave background polarization*, arXiv preprint astro-ph/0403392, 2004
- [46] Kosowsky, A., *Cosmic microwave background polarization*, arXiv preprint astro-ph/9501045, 1995

- [47] Ade, P., *et al.*, *Detection of B-mode polarization at degree angular scales by BICEP2*, Physical Review Letters, 112, 24, 2014
- [48] Kovac, J., *et al.*, *Detection of polarization in the cosmic microwave background using DASI*, Nature, 420, 6917, 772–787, 2002
- [49] Ade, P. *et al.*, *Joint analysis of BICEP2/Keck Array and Planck data*, Physical review letters, 114, 10, 101301, 2015
- [50] Yuki D. T., *Recursos Online: Caltech Observational Cosmology*, http://bicep.caltech.edu/public/bicep_pubs.htm, 2002, Acessado em: 10-06-2015
- [51] Crittenden, R., Turok, N., *Looking for a cosmological constant with the Rees-Sciama effect*, Physical Review Letters, 76, 4, 575, 1996
- [52] Lewis, A., Challinor, A., *Weak gravitational lensing of the CMB*, Physics Reports, 429, 1, 1–65, 2006

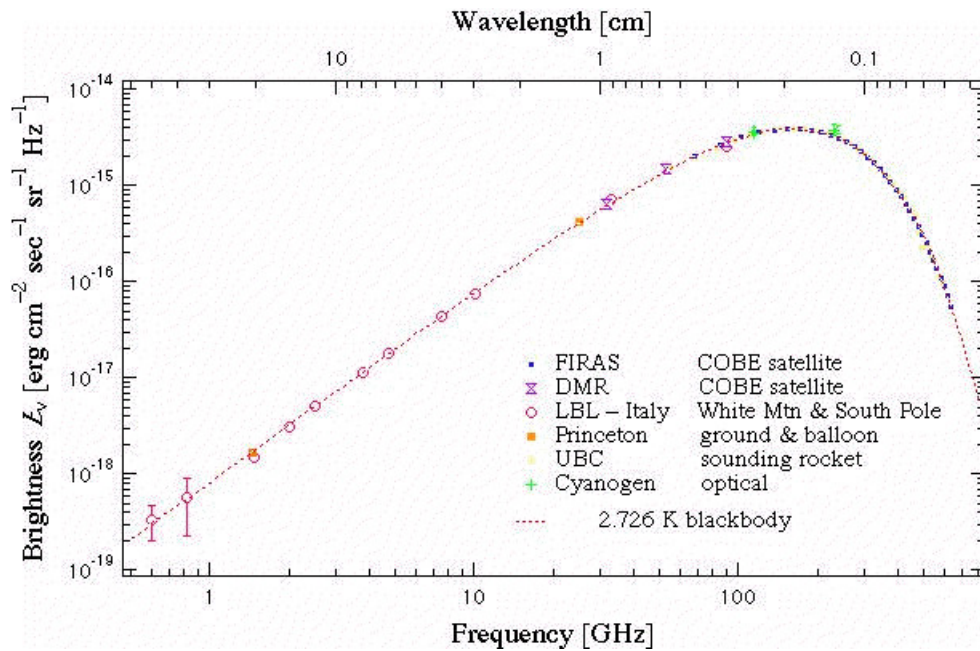


Figura 1: Medidas da intensidade da RCF detectado por vários experimentos. A curva tracejada indica o ajuste do espectro de corpo negro com temperatura igual a 2,726 K. Fonte: Imagem retirada de recursos online especificado em [16].

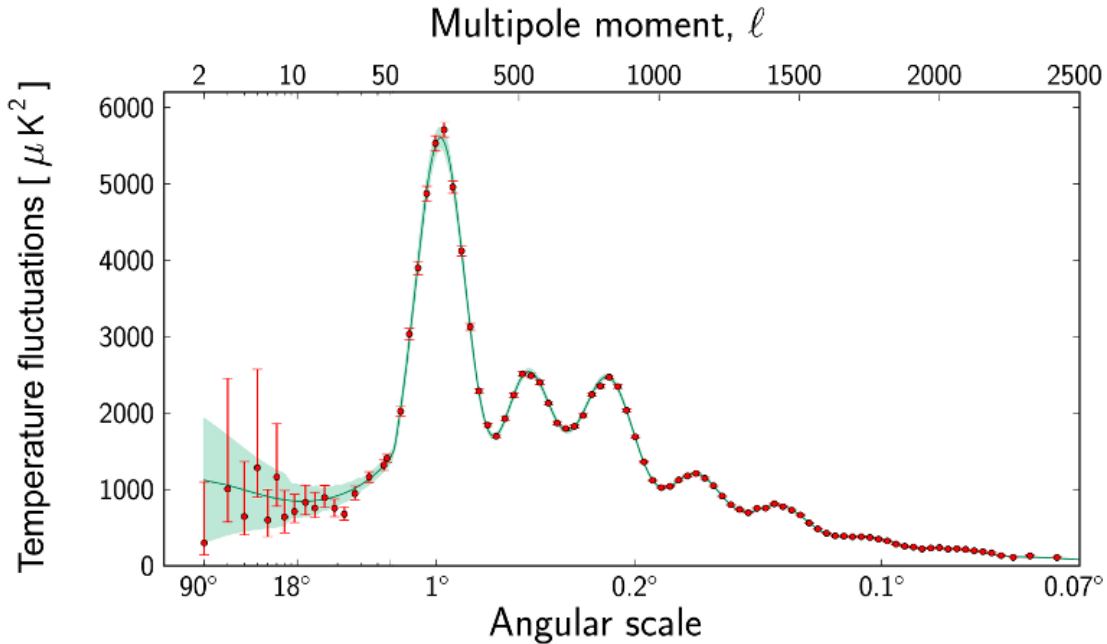


Figura 2: Medidas do espectro de potência da temperatura da RCF realizada pelo satélite Planck (dados do primeiro release). Os pontos em vermelho representam os medidas da RCF enquanto que a curva contínua (verde) representa o melhor ajuste dos dados. Fonte: [24]

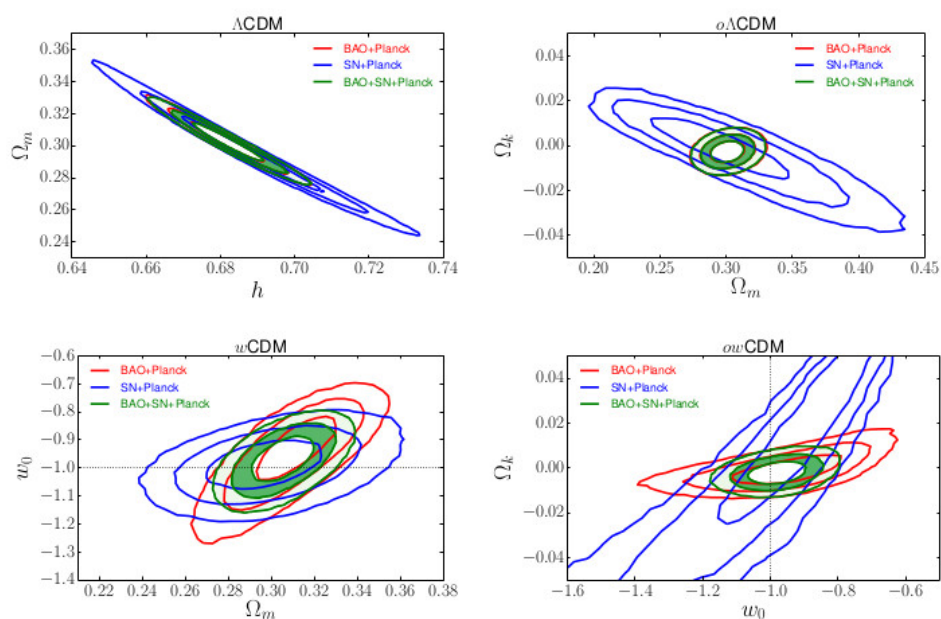


Figura 3: Combinação de contornos de confiança de parâmetros cosmológicos em uma variedade de modelos de energia escura: Λ CDM (superior esquerda), ω CDM (inferior esquerda), $o\Lambda$ CDM (superior direita), ow CDM (inferior direita). As curvas mostram 68%, 95 % e 99.7 % de confiança para a combinação dos dados indicados na legenda: SN (Supernovas), BAO (do inglês, Baryon acoustic oscillations), e Planck (se refere aos parâmetros extraídos a partir das observações da RCF pelo satélite Planck). Fonte: [25]

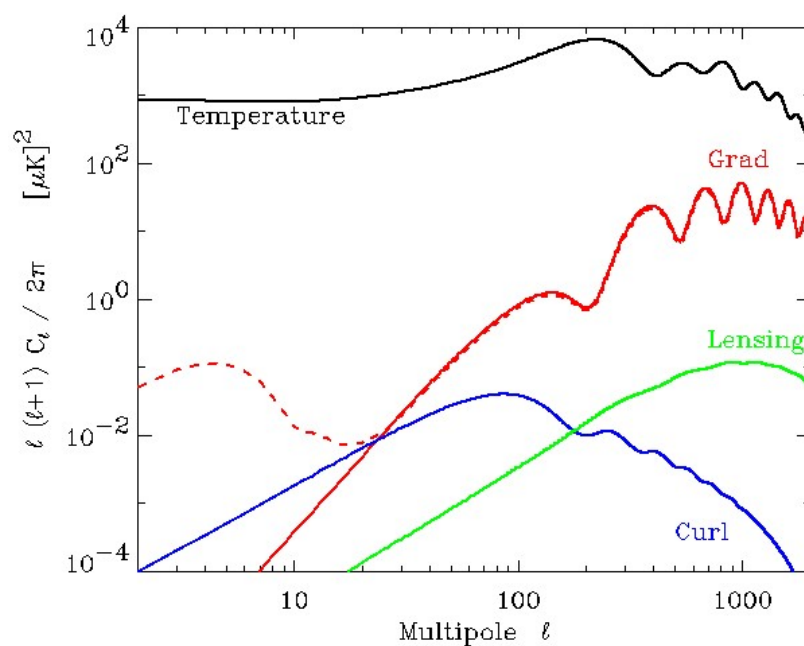


Figura 4: Espectros de potência: das anisotropias de temperatura da RCF (preto), do modo EE de polarização (em vermelho), do modo BB de polarização (em azul) devido a ondas gravitacionais com uma razão tensor/escalar $r=0,28$ e o modo BB ocasionado pelo efeito de LGF (verde). Todos espectros são de acordo com modelo padrão. A curva tracejada indica o efeito da reionização no modo EE. Fonte: Imagem retirada de recursos online especificado em [50].