MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-13269-MAN/45 - versão 1

ANOMALIAS NA DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

Larissa Carlos de Oliveira Santos

Dissertação de Mestrado em Astrofísica orientada pelo Dr. Thyrso Villela Neto e pelo Dr. Armando B. Bernui Leo

INPE
São José dos Campos
2009

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Gabinete do Diretor (GB)
Serviço de Informação e Documentação (SID)
Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3945-6911/6923
Fax: (012) 3945-6919
E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:
Presidente:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)
Membros:
Dr. Demétrio Bastos Netto - Conselho de Pós-Graduação
Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)
Dra. Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)
Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)
BIBLIOTECA DIGITAL:
Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Jefferson Andrade Anselmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Vinicius da Silva Vitor - Serviço de Informação e Documentação (SID) - bolsista
REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:
Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)
Yolanda Ribeiro da Silva e Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)
EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:
Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-13269-MAN/45 - versão 1

ANOMALIAS NA DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA RADIAÇÃO CÓSMICA DE FUNDO EM MICROONDAS

Larissa Carlos de Oliveira Santos

Dissertação de Mestrado em Astrofísica orientada pelo Dr. Thyrso Villela Neto e pelo Dr. Armando B. Bernui Leo

INPE
São José dos Campos
2009

00.000.00(000.0)

Santos. L.

Anomalias na distribuição angular da Radiação Cósmica de Fundo/ Santos. L. – São José dos Campos: INPE, 2009.
85p.; (INPE-13269-MAN/45 - versão 1)

1. Cosmologia. 2. Radiação Cósmica de fundo. 3. Distribuição angular. 4. Anomalias. 5. Cosmology. 6. Cosmic Microwave Background. 7. Angular distribution. 8. Anomalies.

.

Armando B. Bernui Leo _____

José Carlos Neves de Araújo _____

Thyrso Villela Neto _____

A meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio, incentivo e, principalmente, pela torcida fervorosa. À minha irmã, pelas conversas noturnas intermináveis nas minhas idas à Brasília e à Meg, pelo carinho incondicional todos esses anos.

Aos meus grandes amigos, Beatriz, Sabrina, Sarah, Celso e Paulo pelos momentos inesquecíveis que passamos juntos.

Aos meus orientadores, Thyrso Villela, pela amizade, apoio e dedicação, e Armando Bernui, pelo interesse e dedicação.

Às minhas novas amigas, Carla, Érica e Karleyne, pelos almoços de sábado, viagens e conversas que fizeram de São José dos Campos um lar.

Aos colegas da divisão de Astrofísica, Dennis Bessada e Ivan Soares, pelas discussões e sugestões.

Aos integrantes do corpo docente da divisão de Astrofísica do INPE, em especial ao Carlos Alexandre, José Carlos Neves de Araújo e Oswaldo Duarte Miranda, pelas conversas, ajuda e interesse.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

RESUMO

Uma característica intrigante da distribuição angular da Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM) foi identificada por meio da análise dos dados obtidos pelo Satélite *COsmic Background Explorer* (COBE). Foi constatado que o valor do quadrupolo medido é mais baixo que o esperado pelo modelo ΛCDM. Análises posteriores mostraram que a probabilidade de ocorrência do valor do quadrupolo observado é surpreendentemente baixa nesse modelo. Outras características não previstas pelo modelo ΛCDM foram detectadas na distribuição angular da RCFM por meio do estudo das medidas do primeiro e dos três anos de observações do satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP), tais como o alinhamente entre o quadrupolo e o octopolo, a planaridade do quadrupolo e do octopolo, o *Cold Spot* e a assimetria Norte-Sul. A probabilidade de que a distribuição angular das flutuações de temperatura da RCFM apresente essas características é muito baixa (menor que 5%), sendo consideradas anômalas e, portanto, merecem uma maior investigação. Nesse trabalho, para investigar as anomalias na RCFM usamos a função de correlação de dois pontos e os dados de 3 e 5 anos do satélite WMAP. As análises foram feitas por hemisférios e por quadrantes nos mapas de multifreqüências utilizando a máscara KQ85 e um corte galáctico de $|b| \leq 10°$. A análise por hemisférios mostrou uma diferença significativa de potência entre os hemisférios do céu opostos nos dados do WMAP5, concordando com os resultados obtidos para o WMAP3. A probabilidade dessa assimetria entre os hemisférios ocorrer, considerando que o modelo ΛCDM esteja correto, foi calculada, para os 5 mapas analisados, entre 4% e 7,7%. Esse resultado, que na média é de 6,6%, não indica que a diferença de potência entre os hemisférios sul e norte seja anômala. Análises posteriores, feitas por quadrantes, mostraram assimetrias entre o quadrante inferior direito e os demais quadrantes. A probabilidade das três assimetrias acontecerem simultaneamente, para o ΛCDM, foi calculada em 0,3%, considerando o mapa ILC de 5 anos produzido pelos pesquisadores do WMAP (ILC5). Essas assimetrias são, portanto, consideradas anômalas. Para uma análise mais detalhada, foram feitas duas mudanças nos valores do quadrupolo e do octopolo no espectro de potência do modelo ΛCDM. Na primeira alteração, o quadrupolo e o octopolo assumiram o mesmo valor do hexadecupolo do modelo. Na segunda mudança, o quadrupolo e o octopolo assumiram seus respectivos valores observacionais do WMAP5. Novas probabilidades foram, então, calculadas para esses espectros ligeiramente modificados e elas não apresentaram mudanças muito significativas tanto por hemisférios quanto por quadrantes, o que nos leva a concluir que as assimetrias não estão relacionadas aos valores do quadrupolo e octopolo. Por fim, algumas hipóteses foram testadas para tentar explicar a anomalia dos quadrantes: uma possível influência do *Cold Spot*, do alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo, ou da assimetria da máscara utilizada na análise. Todavia, nenhuma das hipóteses acima explica a anomalia por quadrantes. Além disso, ao contrário do que se esperava, quando a máscara KQ85 não é utilizada na análise, a probabilidade das três assimetrias acontecerem simultaneamente no mapa ILC5 cai para menos de 0,1%.

ANOMALIES IN THE ANGULAR DISTRIBUTION OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND

ABSTRACT

A very intriguing feature in the angular distribution of the Cosmic Microwave Background (CMB) was found in the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite data. The reported quadrupole amplitude was smaller than expected in the cosmological concordance model. Later analyses showed that the chance of having this measured quadrupole value in the model is quite low. Some other unexpected features were reported in the one- and three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) data, such as the alignment between the quadrupole and octopole, the Cold Spot and the North-South asymmetry. The chance of having these peculiar features in the angular distribution of CMB is less than 5%. Therefore they are considered anomalous, and should be studied in detail. In this work, we investigate the anomalies in the CMB angular distribution using the two point angular correlation function and the 3- and 5-year WMAP data. The analysis was done for hemispheres and quadrants in the Internal Linear Combination (ILC) maps using the KQ85 mask and a Galactic cut $|b| \leq 10°$. This analysis showed a significant difference in power between the two opposite hemispheres in the WMAP5 data and it agrees with the analysis done for WMAP3. The chance of having an hemisphere asymmetry, assuming that the ΛCDM model is correct, lies between 4% and 7.7%, considering 5 ILC maps from WMAP3 and WMAP5. Calculating the average, we get 6.6%, which mean that this result can not be considered anomalous. Later analysis, done for quadrants, showed asymmetries between the southeastern quadrant and the other quadrants. The chance of having these 3 asymmetries simultaneously is 0.3% for the ILC 5-year map of the WMAP team (ILC5), considering the ΛCDM model. These asymmetries are therefore considered anomalous. To study the hemisphere and quadrant asymmetries in detail, we changed the quadrupole and octopole amplitudes from the ΛCDM model spectra twice. First of all, we changed the value of the quadrupole and octopole to fit the value of the hexadecupole in the cosmological concordance model. The second change was done to fit the quadrupole and octopole amplitudes to their observable values from WMAP 5-year data. New probabilities were calculated for these new spectra and no significant differences were found in the results, neither for hemispheres nor for quadrants. We conclude that the quadrupole and octopole amplitudes are not related to the reported asymmetries. Finally, we tested three hypotheses that could explain the quadrant anomaly: a possible influence of the Cold Spot, the alignment between the quadrupole and octopole, or the asymmetric mask used in the analysis. Nevertheless, none of these hypotheses explained the quadrant anomaly. Moreover, when we did not use the KQ85 mask in the analysis we found that the chance of having the 3 asymmetries at the same time for the ILC5 map was less than 0.1%. This probability is, against our expectations, smaller than the previous one.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO 19
1.1 Modelo Cosmológico Padrão 19
1.2 Descoberta da RCFM e principais experimentos 20
1.2.1 Experimentos no solo 22
1.2.2 Experimentos a bordo de balões 23
1.3 Anisotropias na distribuição angular da RCFM 23
1.3.1 Anisotropias primárias 23
1.3.2 Anisotropias secundárias 24
1.4 Espectro de potência angular da RCFM 25
1.5 Detecção de anomalias na RCFM 27

2 O SATÉLITE WMAP E OS DADOS UTILIZADOS 31
2.1 Mapa de multifreqüências 33
2.2 Máscaras 34

3 ANOMALIAS NA DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA RCFM 37
3.1 Amplitude do quadrupolo 37
3.2 Planaridade e alinhamento do quadrupolo e ocotopolo 39
3.3 Mancha Fria (*Cold Spot*) 40
3.4 Assimetria Norte-Sul 41

4 METODOLOGIA 43
4.1 Função de correlação de dois pontos 45
4.2 Simulações Monte Carlo 46

5 RESULTADOS 49
5.1 Análise por hemisférios 49
5.2 Análise por quadrantes 52
5.2.1 Influência do 'Cold Spot' 54
5.2.2 Influência do alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo 57
5.2.3 Influência da máscara 59

6 CONCLUSÃO 67

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69

A APÊNDICE A - Efeito Sachs-Wolfe 79

B APÊNDICE B - Harmônicos esféricos 83

LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 Espectro de corpo negro da RCFM 22
1.2 Espectro de potência angular da RCFM com dados obtidos por vários experimentos. A curva contínua é prevista pelo modelo ΛCDM. 26
1.3 Curvas do espectro de potência angular previstas pelo modelo ΛCDM para diferentes valores dos parâmetros cosmológicos, (a) variação nos valores de densidade do universo, (b) variação nos valores de densidade da constante cosmológica, (c) variação nos valores de densidade de matéria bariônica e (d) variação nos valores de densidade de matéria total. 28

2.1 O satélte WMAP. 31
2.2 Mapas do WMAP5 para cada banda de freqüências e o mapa de céu inteiro. Coluna da esquerda, de cima para baixo: bandas K, Ka e Q. Coluna da esquerda, de cima para baixo: bandas V e W e o mapa ILC 32
2.3 Espectro de potência da RCFM obtido com os dados do WMAP5, ACBAR, Boomerang e CBI. 33

3.1 Espectro de potência, C_l, para o modelo ΛCDM (linha contínua). Os quadrados mostram os primeiros multipolos encontrados por Bennett et al. (2003a) . . . 37
3.2 Mapas da RCFM para o quadrupolo, octopolo e multipolos mais altos obtidos sem nenhum corte galáctico, ou seja, para céu inteiro. A escala de temperatura dos mapas está em mK. 39
3.3 Região do mapa combinado das bandas Q, V e W centrada no *Cold Spot* para o WMAP1 (figura da esquerda) e WMAP3 (figura da direita). A escala de temperatura das figuras, representada pelos retângulos, está em μK. A resolução das imagens, que está definida nos eixos das ordenadas e abscissas, é 1024 pixels × 1024 pixels 41
3.4 A curva sólida (histograma) se refere ao espectro de potência do modelo ΛCDM. A curva tracejada mostra o espectro de potência obtido quando a máscara kp2 é utilizada. As curvas ligadas pelos 'x' cinzas e pretos são os espectros estimados para os mapas combinados das bandas V e W do WMAP do hemisfério sul e norte respectivamente. As áreas sombreadas indicam os erros de 1σ e 2σ, levando em consideração o modelo ΛCDM. 42

4.1 Hemisférios norte e sul do mapa ILC5, já com os cortes KQ85 + $|b| < 10°$ . . . 44
4.2 Os quadrantes que foram utilizados na análise, já com os cortes KQ85 + $|b| < 10°$ 45

4.3 Nos espectros de potência acima, a curva continua é a média e a área sombreada está relacionada ao desvio padrão das 1000 simulações para cada grupo. De cima para baixo: espectro de potência do grupo 1 (ΛCDM), grupo 2 ($C_2 = C_3 = C_4 = 323,9751\mu K^2$) e grupo 3 ($C_2 = C_2WMAP$ e $C_3 = C_3WMAP$). . . 48

5.1 As figuras da esquerda e da direita mostram as curvas obtidas com a função de correlação de dois pontos do mapa ILC5 para o hemisfério norte e sul respectivamente. A parte sombreada é o desvio padrão dos hemisférios para as 1000 simulações do grupo 1. 50
5.2 As figuras da esquerda, de cima para baixo, mostram as curvas obtidas com a função de correlação de dois pontos do mapa ILC5 para o QSE e QSD, respectivamente. Da mesma forma, para as figuras da direita, de cima para baixo, as curvas foram obtidas para o QIE e QID, respectivamente. A parte sombreada é o desvio padrão dos quadrantes para as 1000 simulações do grupo 1. 52
5.3 Histograma de variações de temperatura do mapa ILC5 na região do *Cold Spot*. 55
5.4 Histogramas dos três mapas anômalos simulados do grupo 1. 55
5.5 Histogramas dos seis mapas anômalos simulados do grupo 2. 57
5.6 Histogramas dos 16 mapas anômalos simulados do grupo 3. 58
5.7 Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) para as 3 simulações anômalas do grupo 1. 60
5.8 Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) para as 6 simulações anômalas do grupo 2. 61
5.9 Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) do MC 1052 até o MC 1595 do grupo 3. 62
5.10 Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) do MC 1625 até o MC 1949 do grupo 3. 63
5.11 Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) do MC 1950 até o MC 1969 do grupo 3. 64
5.12 As figuras da esquerda, de cima para baixo, mostram as curvas obtidas com a função de correlação de dois pontos do mapa ILC5 para o QSE e QSD, respectivamente. Da mesma forma, para as figuras da direita, de cima para baixo, as curvas foram obtidas para o QIE e QID, respectivamente. A parte sombreada é o desvio padrão dos quadrantes para as 1000 simulações do grupo 1. 65

LISTA DE TABELAS

Pág.

4.1 Mapas de multifreqüências 43
4.2 Potências do quadrupolo, do octopolo e do hexadecupolo 47

5.1 Probabilidades calculadas para o grupo 1 de simulações Monte Carlo. 50
5.2 Probabilidades calculadas para o grupo 2 de simulações Monte Carlo. 51
5.3 Probabilidades calculadas para o grupo 3 de simulações Monte Carlo. 51
5.4 Probabilidades calculadas para o grupo 1 de simulações Monte Carlo. 53
5.5 Probabilidades calculadas para o grupo 2 de simulações Monte Carlo. 53
5.6 Probabilidades calculadas para o grupo 3 de simulações Monte Carlo. 54
5.7 Assimetrias nos três grupos de simulações Monte Carlo 54
5.8 Características dos histogramas das simulações anômalas do grupo 1 56
5.9 Características dos histogramas das simulações anômalas do grupo 2 56
5.10 Características dos histogramas das simulações anômalas do grupo 3 59
5.11 Probabilidades calculadas para o grupo 1 de simulações Monte Carlo. 60
5.12 Assimetrias para o grupo 1 de simulações Monte Carlo sem utilização da máscara KQ85 64

1 INTRODUÇÃO

O estudo da cosmologia é realizado utilizando modelos na tentativa de descrever a dinâmica do Universo. Dentre esses modelos, o Modelo Cosmológico Padrão (MCP), atualmente, é bastante aceito devido ao seu sucesso perante os confrontos com dados observacionais. O desenvolvimento do MCP iniciou-se em 1922 quando o matemático russo Alexander Alexandrovich Friedman encontrou uma solução para as equações de campo da Relatividade Geral (RG), supondo o universo como sendo homogêno e isotrópico para grandes escalas, na qual o raio do universo era variável (FRIEDMAN, 1922). Ao contrário do que se acreditava na época, esse resultado sugeria que o universo teve um início. Anos mais tarde, em 1929, Edwin Hubble mostrou, por meio da relação entre as velocidades medidas das galáxias e suas respectivas distâncias, que o universo está em expansão (HUBBLE, 1929). Levando em consideração esses resultados, o padre belga Georges Lemaître foi o primeiro a propor que o universo teve um início com um estágio primordial de alta densidade, o qual ele chamou átomo primordial (LEMAîTRE, 1931).

Baseado no modelo de universo de Lemaître, Alpher, Bethe e Gamow publicaram o famoso artigo $\alpha\beta\gamma$ em 1948, no qual eles concluiram, através do estudo da abundância dos elementos químicos, que o universo deveria ter sido formado por um gás de nêutrons em um estado de alta temperatura e densidade, o qual, como resultado da expansão, começou a decair em prótons e elétrons (ALPHER et al., 1948). Nesse mesmo ano, Gamow concluiu que o universo primordial, devido à sua alta temperatura, deveria ser constituído principalmente por radiação com a característica de corpo negro (GAMOW, 1948a; GAMOW, 1948b). A previsão da existência dessa radiação, que mais tarde seria conhecida como Radiação Cósmica de Fundo em Microondas (RCFM), também foi feita por Alpher e Herman (1948) naquele mesmo ano e eles calcularam que a temperatura da RCFM deveria ser hoje de aproximadamente 5K.

Nesse capítulo farei uma breve introdução sobre o MCP, bem como SOBRE A descoberta da RCFM e suas principais características. Os principais experimentos que possibilitaram as medidas das características da RCFM também serão apresentados.

1.1 Modelo Cosmológico Padrão

De acordo com o MCP, o universo está em expansão e é constituído dominantemente por radiação, hádrons e léptons nos instantes iniciais. Partículas e radiação estariam acopladas devido à alta temperatura e densidade do meio, o qual chamamos de plasma primordial. Nesse cenário, a probabilidade de átomos neutros ou núcleos ligados serem formados é mínima, pois qualquer núcleo ou átomo neutro formado seria rapidamente destruído

devido aos fótons altamente energéticos presentes no meio.

À medida que o universo se expande, sua temperatura diminui, permitindo a formação de núcleos de elementos leves (D, ^3He, ^4He), processo conhecido como nucleossíntese primordial. Quando essa energia, de aproximadamente 1 MeV, que caracteriza a interação nuclear, é atingida, o plasma primordial é constituído por bárions, elétrons, pósitrons, fótons e neutrinos.

A temperatura do universo continua a decair com o passar do tempo t e quando t é aproximadamente 300.000 anos a energia dos fótons se torna menor que a energia de ionização do átomo de Hidrogênio, que é de 13,6 eV. Os elétrons livres presentes no meio foram então capturados para um dos estados de energia quantizada do átomo neutro, formando átomos de Hidrogênio neutro, processo chamado de recombinação. Com a diminuição do número de elétrons livres, houve uma diminuição do espalhamento Thompson aumentando, assim, o livre caminho médio dos fótons, iniciando o processo de desacoplamento. Ao fim desse processo, o universo se tornou transparente à radiação e os fótons que constituem a RCFM puderam se propagar livremente. Alguns efeitos provocados pelos processos físicos que ocorreram antes do desacoplamento podem ser estudados através da análise da RCFM. A superfície onde aconteceu o desacoplamento é conhecida como Superfície de Último Espalhamento (SUE).

Apesar do MCP estar bem sustendado por dados observacionais, outras observações precisam ser melhor estudadas. Dentre elas, a evidência de que deve existir matéria não bariônica no universo, conhecida como matéria escura[1], cuja existência foi sugerida primeiramente por Zwicky (1933). Acredita-se que dentre as classificações de matéria escura, o universo seja predominantemente composto por matéria escura fria (em inglês, *Cold Dark Matter*). Outra observação importante foi a de supernovas tipo Ia em 1998, que sugeriu a expansão acelerada do universo (RIESS et al., 1998; PERLMUTTER et al.,). Atualmente, tenta-se explicar a expansão acelerada postulando a existência do que chamamos de energia escura. Dentre os candidatos a energia escura, está a constante cosmológica Λ, adicionada ao MCP juntamente com a matéria escura com a finalidade de ajustar o modelo aos dados. Devido à esses fatos, o MCP foi modificado, e é conhecido atualmente como modelo ΛCDM.

1.2 Descoberta da RCFM e principais experimentos

A descoberta da RCFM foi feita por Penzias e Wilson (1965) quando eles calibravam uma antena dos Bell Telephone Laboratories, nos EUA. Esse excesso de ruído, que não

[1]Uma pequena parte da matéria escura é constituída também por matérica bariônica, como por exemplo os MACHOS (*Massive Astrophysical Compact Halo Objects*).

era proveniente do instrumento nem da emissão da atmosfera, foi medido em diferentes direções do céu. A medida da RCFM foi feita em um único comprimento de onda (7,35 cm) e sua temperatura foi estimada em 3,5K. Porém, a interpretação de que essa radiação era a mesma prevista por Gamow na década de 40, proveniente do universo primordial e com um espectro de corpo negro, foi feita por Dicke et al. (1965). Desde então, vários experimentos começaram a ser desenvolvidos com o intuito de estudar essa radiação.

A busca por anisotropias na RCFM se iniciou com Conklin em 1969 (CONKLIN, 1969). Nesse estudo, ele concluiu que, como a Terra tem uma velocidade em relação ao referencial da RCFM, deveria existir um aumento da intensidade da radiação na direção do movimento (efeito Doppler). Uma outra evidência da existência dessa anisotropia, conhecida também como efeito de dipolo, veio em 1971 através de um experimento realizado por Henry (HENRY, 1971). Mais tarde, em 1976, Corey e Wilkinson fizeram um experimento a bordo de balão medindo uma anisotropia em grande escala da RCFM na freqüência de 19 GHz (COREY; WILKINSON, 1976). Em 1977, a anisotropia de dipolo da RCFM foi finalmente confirmada, sendo da ordem de 10^{-3}K, com um receptor de 33 GHz em um experimento a bordo de um avião U-2 por Smoot et al. (1977). Medidas mais precisas para o efeito de dipolo, $(T_x, T_y, T_z) = (-3,07 \pm 0,17, 0,67 \pm 0,09, -0,45 \pm 0.09)$mK, foram realizadas por Fixsen et al. (1983). Em 1985, a amplitude da anisotropia de dipolo foi novamente medida em $3,44 \pm 0,17$mK. Além disso, foi encontrado um limite superior para a amplitude do quadrupolo de 7×10^{-5} (LUBIN et al., 1985).

Em 1989, foi lançado o satélite COBE que confirmou a medida da direção da anisotropia de dipolo $(l, b) = (264,4° \pm 0,3, 48,4° \pm 0,5)$, sendo que $0° \leq l \leq 360°$ e $-90° \leq b \leq 90°$, e uma medida mais precisa de sua amplitude, $3,365 \pm 0,027$mK através da análise dos dados coletados pelo instrumento DMR (*Differential Microwave Radiometer*) (KOGUT et al., 1993). A análise dos dados coletados pelo FIRAS (*Far Infrared Absolute Spectrophotometer*), outro instrumento a bordo do satélite COBE, possibilitou a constatação do espectro de corpo negro da RCFM com temperatura de $T = 2,735 \pm 0,06$ (MATHER et al., 1990) (ver Figura 1.1). A precisão na medida da temperatura da RCFM foi melhorada, também utilizando o FIRAS, por Fixsen e Mather (2002), sendo $T = 2,725 \pm 0,001$.

A análise dos dados do DMR possibilitou a descoberta de anisotropias de caráter cosmológico em grandes escalas angulares da RCFM. Essa variação de temperatura com relação à temperatura média da RCFM é da ordem de 10^{-5} (SMOOT et al., 1992). Inspirados pelo resultado obtido pelo COBE, vários experimentos no solo e a bordo de balões foram realizados com a finalidade de se obter novas medidas e caracterizar a RCFM mais detalhadamente. Entre esses experimentos, alguns se destacaram e serão citados a seguir.

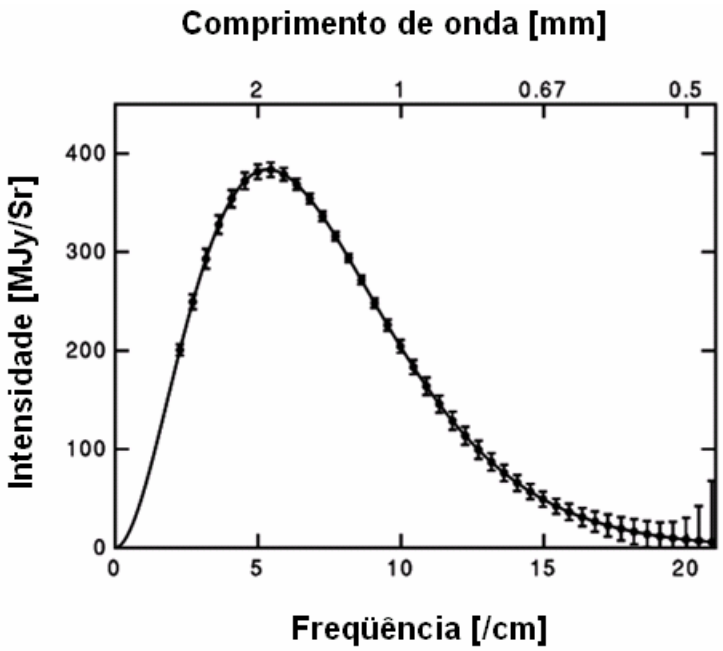

Figura 1.1 - Espectro de corpo negro da RCFM

Fonte: adaptado de Mather et al. (1990)

1.2.1 Experimentos no solo

ACBAR (*Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver*): Experimento que está sendo realizado no Pólo Sul desde o ano de 2001 e cuja finalidade é obter medidas de variações na temperatura e polarização da RCFM. O ACBAR opera nas freqüências de 150, 220, 280 e 350 GHz e em escalas angulares que variam de $4'$ até $3°$ (RUNYAN et al., 2003).

CBI (*Cosmic Background Imager*): Radiotelescópio localizado nos Andes Chilenos desde 1999 que obtém imagens da RCFM em escalas angulares que variam de $5'$ até $1°$. O CBI opera em 10 freqüências entre 26 e 36 GHz (PADIN et al., 2002).

DASI (*Degree Angular Scale Interferometer*): Interferômetro localizado no Pólo Sul que obtém medidas de anisotropias, de polarização e temperatura da RCFM em escalas angulares que variam de $12'$ até $1,8°$. O DASI opera em 10 freqüências entre 26 e 36 GHz (LEITCH et al., 2000).

VSA (*Very Small Array*): Radiotelescópio construído em Tenerife para fazer observações de alta resolução da RCFM em escalas angulares que variam de $12'$ até $3°$ e opera em freqüências entre 26 e 36 GHz (WATSON et al., 2003).

1.2.2 Experimentos a bordo de balões

ARCHEOPS: O experimento realizou 5 vôos entre 1999 e 2002. A finalidade do ARCHEOPS era fazer observações das anisotropias de temperatura da RCFM, operando nas freqüências de 143, 217, 353 e 545 GHz em escalas angulares que variam de 15′ até 18° (BENOIT et al., 2002).

BOOMERanG (*Balloon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics*): O experimento realizou 2 vôos, em 1998 e 2002 no Pólo Sul. O experimento operou entre 90 e 420 GHz em escalas angulares que variam de 10′ até 7° (BERNARDIS et al., 2001).

MAXIMA (*Millimeter Anisotropy eXperiment Imaging Array*): O experimento foi projetado para medir o espectro de potência angular das flutuações da RCFM. O experimento realizou 2 vôos bem sucedidos um em 1998 e outro em 1999. O MAXIMA operou em freqüências entre 150 e 420 GHz em escalas angulares que variavam de 12′ até 4° (HANANY et al., 2000).

Em 2001, foi lançado o satélite WMAP, que será melhor descrito no Capítulo 2, com a finalidade de proporcionar um estudo mais detalhado das anisotropias de temperatura da RCFM, que serão classificadas abaixo.

1.3 Anisotropias na distribuição angular da RCFM

As anisotropias na distribuição angular da RCFM são classificadas de acordo com sua origem. Anisotropias primárias foram geradas na RCFM até a época do desacoplamento enquanto anisotropias secundárias ocorreram durante a trajetória dos fótons da SUE até nós (BERSANELLI et al., 2002). A seguir, descreveremos as principais fontes que podem produzir tanto anisotropias primárias quanto secundárias.

1.3.1 Anisotropias primárias

Flutuações adiabáticas: anisotropias em escalas angulares de até 2° que estão relacionadas às perturbações de densidade no fluido primordial até a época da recombinação. Acredita-se que o universo passou por uma rápida expansão nos primeiros instantes após o *Big Bang*. Essa expansão amplificou as flutuações quânticas presentes no meio, proporcionando o surgimento de ondas acústicas que, modificadas pelo campo gravitacional, causaram as oscilações de densidade no plasma primordial. A contribuição das flutuações adiabáticas na variação de temperatura da RCFM é dada por (para maiores detalhes ver Kolb e Turner (1994), Capítulo 9):

$$\frac{\Delta T}{T} \propto \frac{\delta \rho}{\rho}, \tag{1.1}$$

ssendo que ρ representa a densidade de matéria.

Efeito Sachs-Wolfe: esse efeito é causado por perturbações escalares na métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW), que no contexto Newtoniano se relaciona às perturbações no potencial gravitacional Ψ. Essas flutuações no potencial na SUE foram causadas por irregularidades na distribuição de matéria (bariônica e escura). Como bárions e radiação estavam acoplados, os fótons também estavam imersos nesse potencial gravitacional, de onde saíram após o desacoplamento. Os fótons, portanto, perderam energia, gerando flutuações de temperatura. As variações de temperatura com relação à temperatura média causadas pelo chamado efeito Sachs-Wolfe são dadas pela equação:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{3}\Psi, \tag{1.2}$$

sendo que o potencial gravitacinal Ψ é dado em unidades naturais. Esse efeito foi originalmente descrito por Sachs e Wolfe (1967) e domina em escalas angulares maiores que 2°, sendo o tipo de flutuação de temperatura detectada pelo COBE. As análises de flutuações de temperatura realizadas nesse trabalho estão centradas em escalas angulares dominadas pelo efeito Sachs-Wolfe e por essa razão um desenvolvimento mais detalhado da obtenção da Equação 1.2 pode ser vista no Apêndice A.

Efeito Doppler: efeito causado devido às velocidades peculiares do fluido primordial. Para fótons com velocidade peculiar v com relação ao plasma, a perturbação na distribuição angular das flutuações de temperatura é dada por:

$$\frac{\Delta T}{T} \simeq \frac{v}{c}. \tag{1.3}$$

Esse efeito é observado em escalas angulares de $10'$ até 2°.

1.3.2 Anisotropias secundárias

Efeito Sachs-Wolfe integrado (SWI): esse efeito ocorre devido às variações no tempo dos poços de potencial durante a trajetória do fóton da SUE até nós. Se um fóton entrar e sair de um poço de potencial constante no tempo não haverá variação total de energia. Porém, se a profundidade do poço variar durante a passagem do fóton, o ganho de energia

causado pela entrada do fóton o poço não cancelará a perda de energia causada pela saída desse poço, variando, portanto, a energia do fóton.

Efeito de lente gravitacional: ao contrário do efeito SWI, o efeito de lente gravitacional não modifica a energia do fóton, mas sim sua trajetória. Esse efeito é bastante fraco sendo ,portanto, difícil de ser detectado.

Efeito Sunyaev-Zel'dovich (SZ): ocorre devido ao espalhamento Compton inverso dos fótons da RCFM por elétrons relativísticos presentes no interior de aglomerados de galáxias. Esse espalhamento causa uma distorção no espectro de corpo negro da RCFM, e é conhecido como efeito SZ térmico. Velocidades peculiares nos aglomerados também produzem anisotropias secundárias na RCFM via efeito Doppler. Esse efeito é conhecido como efeito SZ cinético.

1.4 Espectro de potência angular da RCFM

Supondo que o universo seja homogêneo e isotrópico, o procedimento padrão para se obter o espectro de potência angular da RCFM é expandir a distribuição das flutuações temperatura na esfera celeste com relação à temperatura média ($\Delta T/T$) da RCFM em harmônicos esféricos, que são soluções da equação de Laplace na esfera (para maiores detalhes sobre os harmônicos esféricos ver Apêndice B):

$$\frac{\Delta T}{T}(\theta,\phi) = \sum_{l=2}^{\infty}\sum_{m=-l}^{l} a_{lm}Y_{lm}(\theta,\phi). \tag{1.4}$$

Essa equação é válida para céu inteiro, sendo que θ e ϕ são os ângulos polar e azimutal respectivamente. Os a_{lm}'s representam a amplitude de cada multipolo, l e m são números inteiros de forma que $l \geq 0$ e $-l \leq m \leq l$.

A potência das flutuações de temperatura, C_l, é definida para um universo isotrópico como sendo

$$C_l \equiv \frac{1}{2l+1}\sum_{m=-l}^{l} |a_{lm}|^2. \tag{1.5}$$

Ponderando C_l por $l(l+1)$ e fazendo o gráfico em função dos multipolos, l, obtemos, portanto, o espectro de potência da RCFM [2] que representa a amplitude das flutuações

[2]Essa ponderação dos C_l's por $l(l+1)$, além de tornar os picos dos espectro mais visíveis, é feita principalmente para que possamos visualizar um plateau no espectro para baixos multipolos.

em função da escala angular.

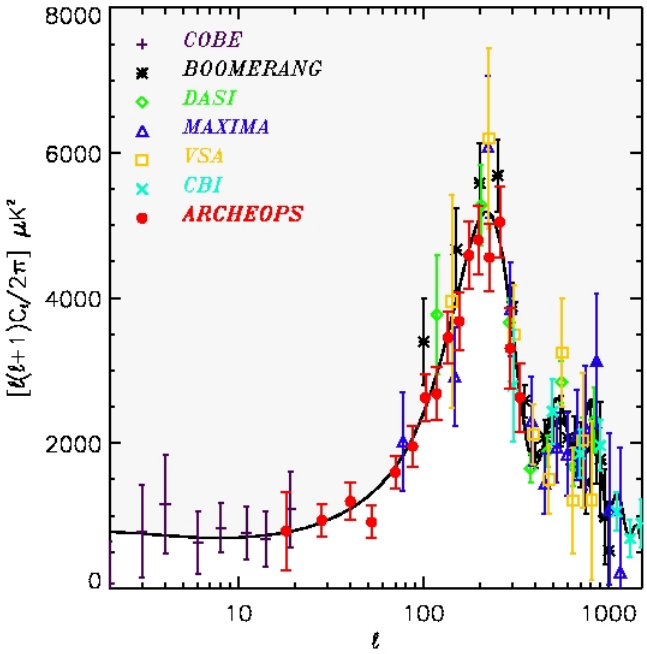

Figura 1.2 - Espectro de potência angular da RCFM com dados obtidos por vários experimentos. A curva contínua é prevista pelo modelo ΛCDM.

Fonte: Benoit et al. (2003)

De acordo com o modelo ΛCDM, os picos visíveis no espectro estão relacionados às flutuações adiabáticas. As ondas acústicas, o modo fundamental e seus harmônicos oscilam no tempo, tendo início quando a dinâmica do universo passa a ser dominada por matéria e terminando na época da recombinação. O primeiro pico acústico é uma evidência do harmônico fundamental, que possui o maior comprimento de onda que poderia aparecer no meio. Os harmônicos subseqüentes, nos quais os comprimentos de onda são múltiplos inteiros do comprimento de onda fundamental, oscilam mais rápido que o modo fundamental causando variações de temperatura em menores regiões do espaço na época da recombinação. Os outros picos acústicos do espectro de potência angular da RCFM são referentes a esses harmônicos.

Todavia, outros fatores também contribuem para a forma do espectro. O campo gravitacional comprime o plasma em regiões mais densas e, dependendo da fase das ondas acústicas, essa compressão gravitacional se soma à compressão ou à rarefação causada pelas ondas. Na recombinação, o modo fundamental de vibração das ondas acústicas

aparece em fase com a compressão gravitacional promovendo uma grande variação de temperatura. No entanto, o segundo harmônico estaria defasado de 180° com relação à compressão gravitacional, diminuindo assim a amplitude da variação de temperatura do plasma. Esse fato explica a diferença entre as alturas do primeiro e do segundo pico no espectro de potência angular da RCFM.

A Figura 1.2 mostra os dados de diversos experimentos e a curva prevista pelo modelo ΛCDM para o espectro, sendo possível notar que ambos apresentam uma certa concordância, principalmente levando-se em consideração as barras de erros dos dados. Para uma melhor compreensão do gráfico, é importante saber a relação existente entre os multipolos e as separações angulares no céu, que é $l \simeq 180°/\theta$.

O conhecimento da forma do espectro de potência angular da RCFM, como por exemplo a localização dos picos e suas respectivas alturas, permite a estimativa de diversos parâmetros cosmológicos. A Figura 1.3 mostra como a variação de alguns parâmetros modifica a forma da curva prevista pelo modelo. Após a localização precisa do primeiro pico acústico pelo BOOMERanG e MAXIMA, concluiu-se que a densidade do universo é muito próxima da densidade crítica ($\rho_c = 1,88h^2 \times 10^{-29} g/cm^3$), em que h é incerteza na medida da constante de Hubble, H_0, e vale hoje $0,719^{+0,026}_{-0,027}$. Esse resultado mostra que o universo é plano. Outros parâmetros comológicos foram definidos a partir dos dados do WMAP, como, por exemplo, a densidade atual de matéria escura, matéria bariônica e energia escura no universo[3].

Analisando o espectro para baixos multipolos ($2 \leq l \leq 10$), região dominada pelo efeito Sachs-Wolfe, observamos características não previstas pelo Modelo Cosmológico Padrão na distribuição angular da RCFM. Algumas dessas características são considera-das anomalias na distribuição das flutuações de temperatura da RCFM, pois, estatisticamente, a chance delas ocorrerem é muito pequena.

1.5 Detecção de anomalias na RCFM

O modelo inflacionário foi também adicionado ao MCP com a finalidade de explicar, dentre outros fenômenos, como fótons que não estavam aparentemente conectados causalmente na SUE constituem os fótons da RCFM à mesma temperatura. De acordo com esse modelo, espera-se que o universo seja estatisticamente isotrópico. Portanto, vários testes começaram a ser feitos com o intuito de confirmar essa característica, que é fundamental no modelo. Analisando os dados produzidos pelo instrumento DMR, a bordo do satélite COBE, foi constatado que o valor do sinal do quadrupolo ($l = 2$) estava abaixo do espe-

[3]Normalmente as densidades são escritas em função da densidade crítica, de forma que $\Omega_i = \rho_i/\rho_c$.

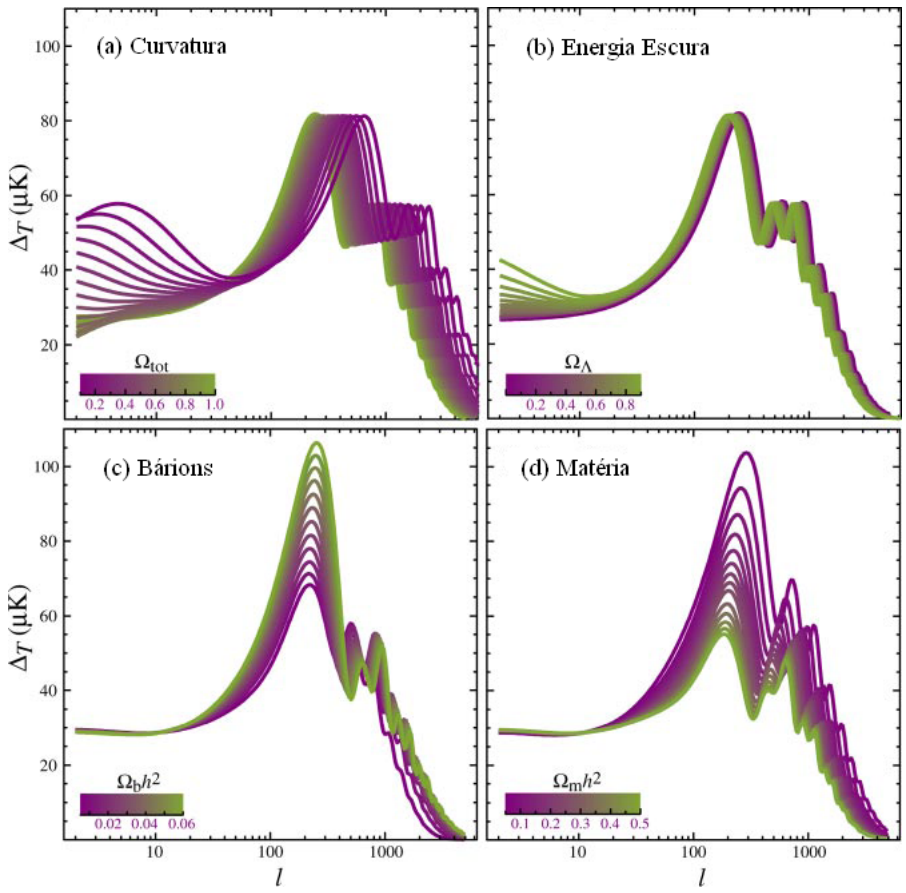

Figura 1.3 - Curvas do espectro de potência angular previstas pelo modelo ΛCDM para diferentes valores dos parâmetros cosmológicos, (a) variação nos valores de densidade do universo, (b) variação nos valores de densidade da constante cosmológica, (c) variação nos valores de densidade de matéria bariônica e (d) variação nos valores de densidade de matéria total.

Fonte: adaptado de Hu e Dodelson (2002)

rado pelo MCP (SMOOT et al., 1992). Todavia, achava-se que esse baixo sinal poderia ser devido à emissão da Galáxia.

Após a liberação dos dados provenientes do WMAP, foi possível constatar que a contaminação Galáctica não contribui de forma significativa para o baixo valor do quadrupolo (TEGMARK et al., 2003). Além disso, na medida da amplitude do quadrupolo, deve-se considerar a barra de erro da medida e a variância cósmica. A variância cósmica é uma limitação intrínseca na medida do espectro devido ao número de amostras possíveis para cada multipolo, sendo portanto maior para baixos multipolos, e é dada por:

$$\Delta C_l = \sqrt{\frac{2}{2l+1}} C_l. \tag{1.6}$$

A busca por desvios de isotropia no universo continuou e duas anomalias foram descobertas nos dados do WMAP por Tegmark et al. (2003): o alinhamento entre o quadrupolo e octopolo ($l = 3$) e a planaridade do octopolo. Um ano mais tarde, essas anomalias foram quantificadas por Oliveira-Costa et al. (2004). Eles calcularam que 94% da potência do octopolo estão associados a direção $|m| = 3$ e que a chance de ocorrer essa planaridade em $l = 3$ é de 1 em 20. O alinhamento entre o octopolo e o quadrupolo ocorre com uma diferença angular entre eles de apenas 10°, sendo que a chance de que esse alinhamento aconteça é de 1 em 66.

Outra anomalia foi descoberta por Eriksen et al. (2004) estudando os mapas de RCFM para $l < 40$. Foi mostrado que existe uma grande diferença de potência entre dois hemisférios opostos nos dados do COBE e do primeiro ano do WMAP. O eixo no qual essa assimetria é maximizada foi também encontrado assim como sua probabilidade de ocorrência (HANSEN et al., 2004).

Analisando também os dados do primeiro ano do WMAP, Vielva et al. (2004) encontraram uma mancha fria nos mapas no hemisfério sul. Apenas 40 de 10000 simulações apresentaram essa característica sendo, portanto, a probablidade de sua ocorrencia de 0,4%.

Neste trabalho, as anomalias serão investigadas por meio da análise dos dados de cinco anos do WMAP utilizando uma metodologia que será detalhada posteriormente.

Essa dissertação está organizada da seguinte forma: faremos uma descrição do satélite WMAP bem como das ferramentas de análise que serão utilizados nesse trabalho no Capítulo 2; no Capítulo 3, detalharemos as anomalias presentes nos mapas da RCFM encontradas na literatura para o primeiro e para os três anos de dados do WMAP; a metodologia utilizada na análise dos mapas e o procedimento para a obtenção dos resultados serão descritos no Capítulo 4; finalmente, a apresentação e discussão dos resultados serão realizadas no Capítulo 5, seguidos do capítulo de conclusão.

2 O SATÉLITE WMAP E OS DADOS UTILIZADOS

O projeto de construção do WMAP foi proposto em 1995, porém o satélite foi lançado somente em 30 de junho de 2001 da base da Força Aérea dos EUA no Cabo Canaveral, Flórida. O WMAP, que pode ser visto na Figura 2.1, tem uma altura de 3,8 m e pesa 836 kg. O disco inferior mede 5,0 m de diâmetro e possui 6 placas solares que fornecem energia para o satélite. Além disso, os intrumentos são blindados de forma a protegê-los da radiação solar (BENNETT et al., 2003b).

Figura 2.1 - O satélte WMAP.

Fonte: http://wmap.gsfc.nasa.gov

O WMAP foi colocado em órbita no segundo ponto de Lagrange Terra-Sol, L2, localizado a $1,5 \times 10^6$ km de nós para minimizar turbulências causadas pela Terra, como, por exemplo, sua emissão em microondas e seus campos magnéticos.

O instrumento a bordo do WMAP consiste em 2 telescópios Gregorianos, sendo que o espelho primário possui 1,4 m $\times$ 1,6 m e o espelho secundário age basicamente como proteção com relação ao sinal da Galáxia (para detalhes, ver Page et al. (2003)). Fazem parte do instrumento, também, 20 radiômetros diferenciais. Eles utilizam amplificadores baseados em diodos HEMT (*High Electron Mobility Transistors*) e estão resfriados a aproximadamente 90K para diminuir erros sistemáticos (JAROSIK et al., 2003). Os radiômetros medem variações de temperatura entre dois pontos no céu e produzem mapas de intensidade em

cinco diferentes bandas de freqüência. O satélite possui 2 radiômetros tanto na banda K quanto na banda Ka, 4 nas bandas Q e V e 8 na banda W, sendo que as bandas possuem freqüências centradas respectivamente em 22, 33, 41, 61 e 94 GHz.

A resolução angular do WMAP varia de acordo com a banda de freqüência, sendo de $0,88°$, $0,66°$, $0,51°$, $0,35°$ e $0,22°$ para as bandas K, Ka, Q, V e W, respectivamente. A Figura 2.2 mostra os mapas obtidos para o WMAP5 nas 5 bandas de freqüência e o mapa de céu inteiro, que será descrito na Seção 2.1.

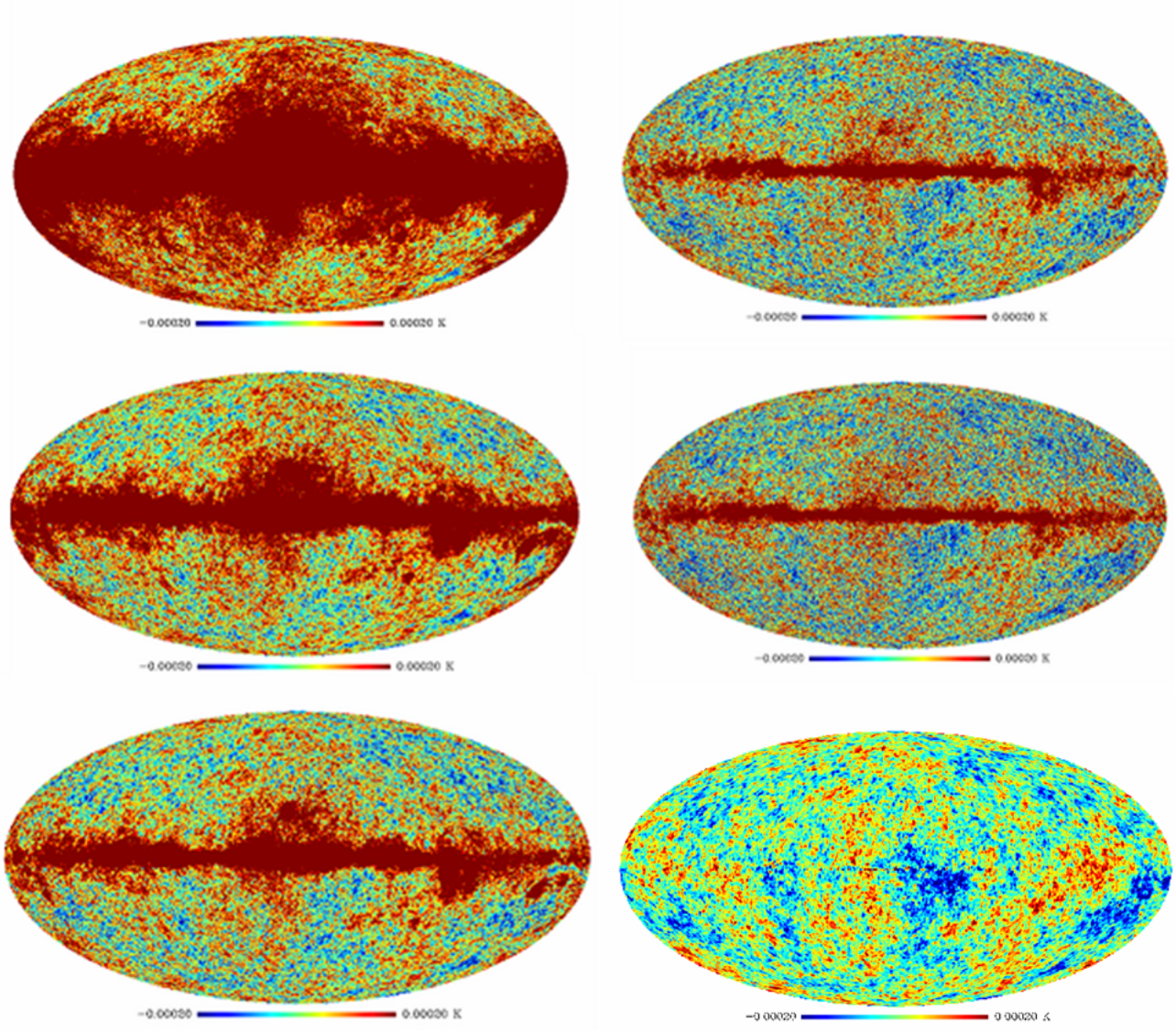

Figura 2.2 - Mapas do WMAP5 para cada banda de freqüências e o mapa de céu inteiro. Coluna da esquerda, de cima para baixo: bandas K, Ka e Q. Coluna da esquerda, de cima para baixo: bandas V e W e o mapa ILC

O WMAP foi desenvolvido pela NASA com a principal finalidade de obter novas medidas da RCFM para que fosse possível realizar um estudo mais detalhado de sua distribuição angular. Para isso, o espectro de potência angular da RCFM foi reconstruido com maior precisão na medida e com maior sensibilidade, ou seja, o espectro foi obtido também para altos valores de multipolos. A sensibilidade do WMAP é na média 45 vezes melhor que a do COBE, medindo um variação de temperatura menor que 20μK por pixel quadrado de $0,3° \times 0,3°$ (BENNETT et al., 2003b). Diferentemente do espectro obtido com os dados do COBE somente para baixos multipolos (plateau), o espectro obtido pelo WMAP mostrou também os primeiros picos acústicos e pode ser visto na Figura 2.3. Com esses novos dados, é possível responder questões fundamentais de cosmologia como, por exemplo, quais os constituintes do universo e quais são os valores dos parâmetros cosmológicos.

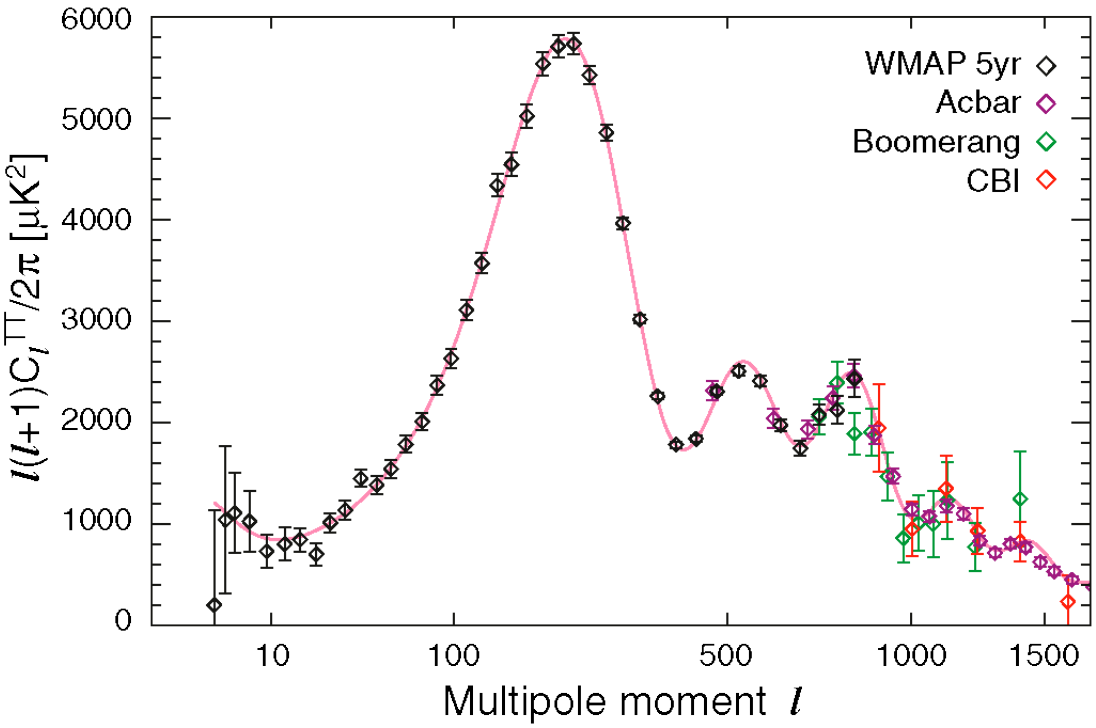

Figura 2.3 - Espectro de potência da RCFM obtido com os dados do WMAP5, ACBAR, Boomerang e CBI.

Fonte: Nolta et al. (2008)

2.1 Mapa de multifreqüências

Além do sinal da RCFM, contaminações provenientes principalmente da Galáxia são encontradas nos dados. Existem três principais componentes de emissão Galáctica e suas contribuições dependem da freqüência na qual a medida é feita. A emissão sincroton,

que está relacionada com a energia perdida por elétrons relativísticos devido aos campos magnéticos presentes na Galáxia, domina para baixas freqüências (no caso dos mapas do WMAP, bandas K e Ka). A emissão *bremsstrahlung* está relacionada com a perda de energia de elétrons relativísticos na interação com campos elétricos de íons presentes na Galáxia e também domina para baixas freqüências. A emissão térmica de poeira domina para altas freqüências (banda W) e é causada pelo aquecimento de grãos de poeira no meio interestelar.

O método ILC (*Internal Linear Combination*) consiste em minimizar a contribuição da Galáxia preservando o sinal da RCFM em um mapa de céu inteiro (BENNETT et al., 2003c; HINSHAW et al., 2007; GOLD et al., 2008). Para isso, o comportamento das componentes de emissão Galáctica precisa ser conhecido. O mapa produzido é uma combinação linear dos mapas nas cinco freqüências do WMAP cujos coeficientes são ajustados para cancelar a emissão da Galáxia suavizado para a maior resolução angular ($0,88^\circ$ na banda K). É importante salientar que apesar do método ILC minimizar a contribuição Galáctica, ele não produz mapas completamente livres de contaminação. Permanece, portanto, uma contaminação residual que deve ser levada em consideração tornando necessária a utilização de máscaras, que serão explicadas na próxima seção, na análise desses mapas. Além do mapa obtido pelos pesquisadores reponsáveis pelo WMAP, que chamarei de mapa ILC, outros mapas de céu inteiro foram produzidos utilizando diferentes métodos. Para a análise dos dados, utilizei diferentes mapas presentes na literatura dos três e dos cinco anos do WMAP.

2.2 Máscaras

Uma outra forma de minimizar a contribuição de *foregrounds* (contaminações, não necessariamente da Galáxia) nos dados é aplicar máscaras nos mapas. As máscaras excluem áreas do mapa dominadas pela emissão Galáctica e preservam as áreas dominadas pela RCFM. As máscaras produzidas para o primeiro ano de dados do WMAP (ano de 2003) são baseadas no mapa da banda K, pois a contaminação Galáctica é mais severa nessa faixa de freqüências. As máscaras foram caracterizadas de acordo com a severidade do corte feito no céu, sendo a máscara Km2 a mais severa, seguida da Km1, Kp0, Kp1, e assim por diante até a Kp12 (BENNETT et al., 2003c). Por fim, essas máscaras foram então somadas com as máscaras de fontes pontuais emissoras de rádio. Para os três anos de dados (2006), as máscaras de fontes pontuais foram atualizadas, pois novas fontes pontuais foram detectadas e adicionadas.

As máscaras para a análise dos dados de temperatura foram modificadas para os dados de cinco anos do WMAP (2008) com o intuito de cortar a emissão de áreas que contêm as

Nebulosas de Gum e de ρ Oph. Essas novas máscaras foram feitas a partir dos mapas das bandas K e Q. Desses mapas é subtraído o mapa ILC, permanecendo, em ambos, somente o sinal da emissão Galáctica. Esses dois mapas são finalmente combinados. A máscara Kp2 foi substituída pelas máscaras combinadas de K e Q 85% (preserva nominalmente 85% do céu), chamada KQ85, e a máscara Kp0 foi substituída pelas máscaras combinadas de K e Q 75%, chamada KQ75. Essas máscaras são também somadas com as máscaras de fontes pontuais incluindo mais 32 novas fontes de uma versão preliminar do catálogo de fontes pontuais para os 5 anos do WMAP (GOLD et al., 2008). O corte realizado busca eliminar os *foregrounds*, porém preserva o máximo possível de área útil do céu para estudos da RCFM.

3 ANOMALIAS NA DISTRIBUIÇÃO ANGULAR DA RCFM

Apesar do modelo ΛCDM ajustar-se bem aos dados da RCFM, algumas características encontradas nos dados possuem uma probabilidade muito baixa de ocorrerem nesse modelo e vêm sendo estudadas desde que foram descobertas. Nesse trabalho, essas características serão consideradas anômalas quando a probabilidade de ocorrerem for menor que 5%. É importante salientar que as probabilidades são calculadas usando estatísticas diferentes, o que também produz variações nos resultados que vêm sendo obtidos na literatura. Nesse capítulo, as anomalias descritas na literatura serão detalhadas e algumas soluções que estão sendo propostas com a finalidade de explicá-las serão mencionadas. Entretanto, uma explicação conclusiva ainda não foi encontrada.

3.1 Amplitude do quadrupolo

O baixo valor do quadrupolo ($l = 2$) vem sendo estudado desde sua confirmação nos dados do WMAP (ver, por exemplo, Efstathiou (2003b)). A Figura 3.1 mostra a potência do quadrupolo observada e a curva para modelo ΛCDM. Para quantificar essa discrepância, os valores dos C_ls encontrados para alguns multipolos são comparados com os valores desses mesmos C_ls para o modelo.

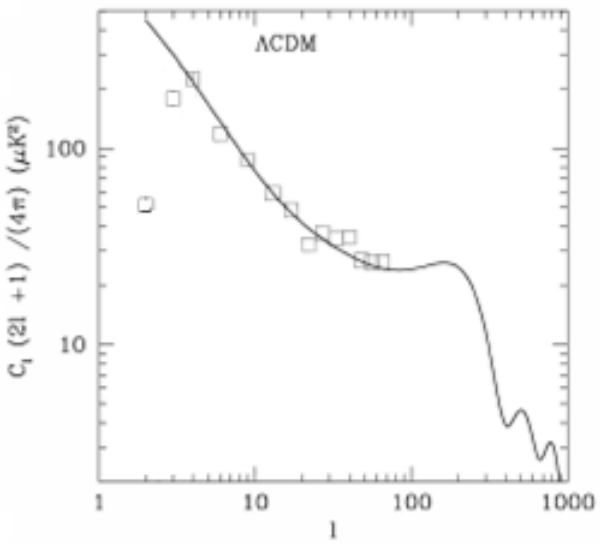

Figura 3.1 - Espectro de potência, C_l, para o modelo ΛCDM (linha contínua). Os quadrados mostram os primeiros multipolos encontrados por Bennett et al. (2003a)

Fonte: adaptado de Gaztañaga et al. (2003).

Para o modelo ΛCDM, as potências relacionadas aos primeiros multipolos não nulos são

(em μK^2) (GAZTAñAGA et al., 2003):

$C_2 = 1130$, $C_3 = 537$, $C_4 = 304$,

que podem ser comparados com os valores encontrados por Bennett et al. (2003a) utilizando os dados do WMAP1:

$C_2 = 129^{+799}_{-129}$, $C_3 = 320 \pm 320$, $C_4 = 316 \pm 104$.

A probabilidade do quadrupolo no modelo ΛCDM ter o valor igual ou mais baixo que o valor do quadrupolo encontrado nos dados foi originalmente calculada em 0,7% (SPERGEL et al., 2003). Todavia, nesse trabalho, o valor do quadrupolo foi medido somente fora do Plano da Galáxia para evitar incertezas causadas pelos *foregrounds* Galácticos residuais. Foi mostrado por Tegmark et al. (2003) que a contribuição dessas contaminações residuais interferem de forma desprezível no valor dos multipolos mais baixos, mas que uma modelagem mais detalhada de *foregrounds* é necessária para quantificar mais rigorosamente essa contribuição. Nesse artigo, o valor do quadrupolo calculado sem o corte Galáctico para o mapa de céu inteiro é, apesar de baixo, maior que o encontrado anteriormente, sendo $C_2 = 195,1 \mu K^2$. Com isso, a probabilidade de ocorrência no modelo ΛCDM desse baixo quadrupolo cresce para 4,8%.

Várias propostas estão sendo feitas para explicar o baixo valor do quadrupolo. Umas das dificuldades de explicar essa anomalia deve-se ao fato de que o modelo ΛCDM se ajusta bem aos dados para pequenas escalas angulares. Se novos mecanismos físicos forem necessários, eles devem manter a concordância para grandes multipolos, se ajustando somente para baixos multipolos. Dentre as propostas, sugere-se que o universo tenha uma topologia compacta. Foi mostrado por Phillips e Kogut (2004) que o baixo valor do quadrupolo é uma condição necessária mas não suficiente para uma topologia compacta. Outras topologias também são sugeridas na literatura (ver, por exemplo, Luminet et al. (2003)). Algumas propostas sugerem também que o espectro de potência seja modificado introduzindo uma escala a partir da qual a potência se anule. Essa escala é escolhida de forma a ajustar o corte aos dados. Uma outra forma de introduzir um corte no espectro é associar uma curvatura positiva ao modelo (ver Bridle et al. (2003), Efstathiou (2003a)). No modelo ΛCDM, a energia escura é representada pela constante cosmológica, e algumas propostas sugerem a utilização de um outro candidato à energia escura no modelo: um campo escalar conhecido como quintessência que também modificaria o espectro para grandes escalas angulares (MOROI; TAKAHASHI, 2004).

3.2 Planaridade e alinhamento do quadrupolo e ocotopolo

Com a finalidade de se entender o motivo pelo qual o valor do quadrupolo aumentava quando calculado sem o corte Galáctico, mapas relacionados aos primeiros multipolos do mapa da RCFM foram obtidos por Tegmark et al. (2003), Oliveira-Costa et al. (2004). Os mapas mostram que a maior parte da potência do quadrupolo e, principalmente, do octopolo está localizada em um eixo preferencial.

Além disso, os eixos preferenciais do quadrupolo e do octopolo estão alinhados em $(l, b) = (-110°, 60°)$ na direção do aglomerado de Virgem. A diferença angular entre os dois eixos preferenciais é de apenas 10°. O alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo pode ser visualizado na Figura 3.2, que mostra os mapas para os primeiros multipolos não nulos obtidos do mapa ILC 5 anos.

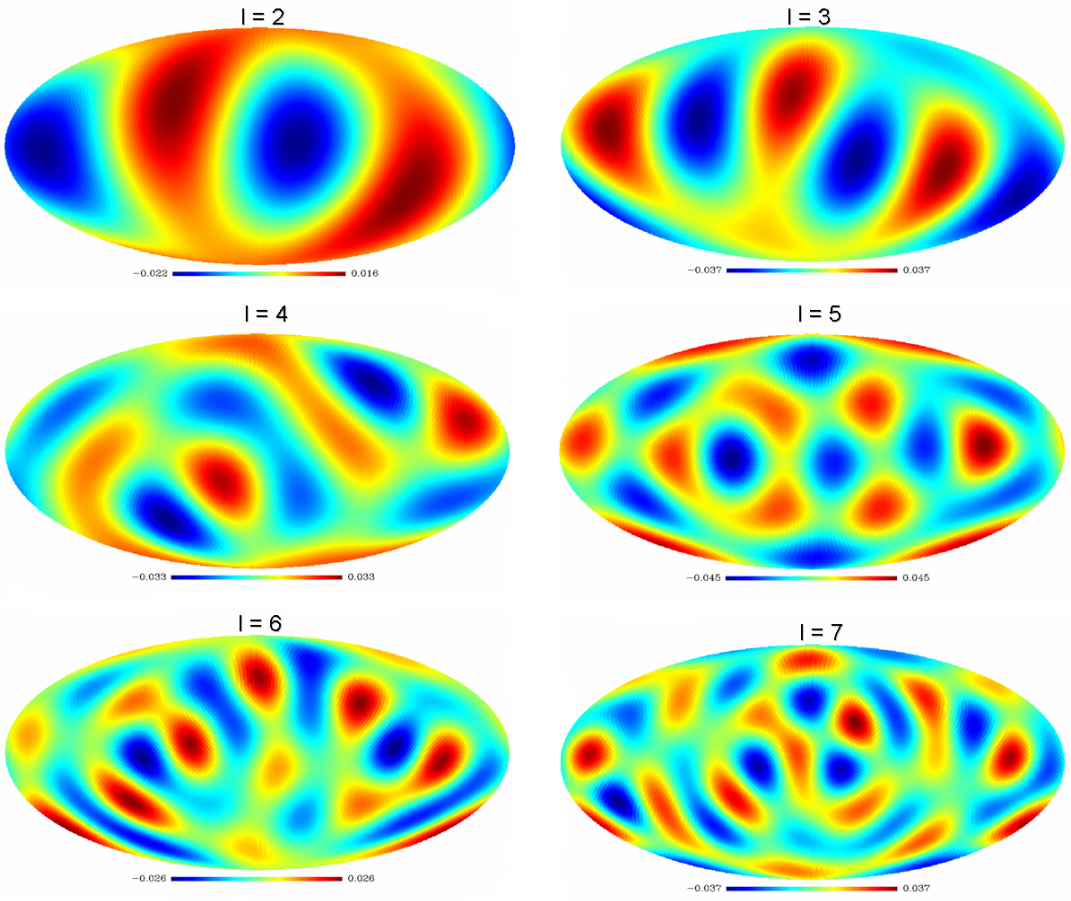

Figura 3.2 - Mapas da RCFM para o quadrupolo, octopolo e multipolos mais altos obtidos sem nenhum corte galáctico, ou seja, para céu inteiro. A escala de temperatura dos mapas está em mK.

A príncipo, a probabilidade de ocorrência das três anomalias (baixo valor do

quadrupolo, planaridade do octopolo e alinhamento entre quadrupolo e octopolo) simultaneamente foi calculada como sendo 1 em 24000, caso o modelo ΛCDM esteja correto (OLIVEIRA-COSTA et al., 2004). Após a descoberta do alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo, outro alinhamento significante foi encontrado entre o octopolo e o hexadecupolo ($l = 4$) nos dados do WMAP3 (ABRAMO et al., 2006).

Alguns trabalhos publicados defendem a idéia de que as anomalias em baixos multipolos possam ser devidas as contaminações residuais nos mapas. Eriksen et al. (2004) concluiram que o mapa ILC não está suficientemente livre de *foregrounds*, portanto nenhuma conclusão definitiva de sua análise deve ser feita. A influência do efeito SZ causado pelo Superaglomerado Local nas anisotropias primárias também poderia introduzir um eixo preferencial em grandes escalas angulares (ABRAMO; SODRÉ, 2003; ABRAMO et al., 2006). Trabalhos mais recentes sugerem a utilização de um modelo cosmológico com topologia não trivial para explicar os alinhamentos (ver, por exemplo, Gurzadyan et al. (2007)).

3.3 Mancha Fria (*Cold Spot*)

Uma outra anomalia foi encontrada nos dados do WMAP1 por Vielva et al. (2004). Uma mancha fria, conhecida como *Cold Spot*, surpreendentemente extensa (diâmetro de aproximadamente 10° no céu) foi detectada nos dados da RCFM ao se analisar o mapa do WMAP combinado das bandas Q-V-W (ver Figura 3.3). O *Cold Spot* está centrado nas coordenadas $(b, l) = (-57°, 209°)$ e possui uma variação máxima de temperatura de $-78\mu K$ (CRUZ et al., 2005).

Após a descoberta do *Cold Spot*, testes foram realizados por Vielva et al. (2004) e vários outros autores com a finalidade de detectar a origem dessa anomalia. Um dos primeiros testes realizados foi analisar os mapas de temperatura obtidos por cada radiômetro em cada banda de freqüência (2 mapas para as bandas Q e V e 4 mapas na banda W). Os mesmos resultados foram obtidos para todos os mapas. Esse teste possibilitou concluir que o *Cold Spot* não foi causado por nenhum radiômetro em particular e que, portanto, os erros sistemáticos causados pelo instrumento não contribuem de forma significativa para existência desta mancha fria. Os *foregrounds* também foram descartados como causa do *Cold Spot*. A detecção da anomalia não tem dependência com a freqüência quando analisadas as bandas menos contaminadas (Q, V e W).

A combinação do sinal da RCFM com o efeito SZ poderia explicar a anomalia, porém é improvável que essa seja a causa, pois a quantidade de gás necessária para gerar o *Cold Spot* é incompatível com a quantidade de galáxias nessa região do céu (CRUZ et al., 2006). A análise dos dados feita por Rudnick et al. (2007) também sugere que a origem do *Cold Spot*

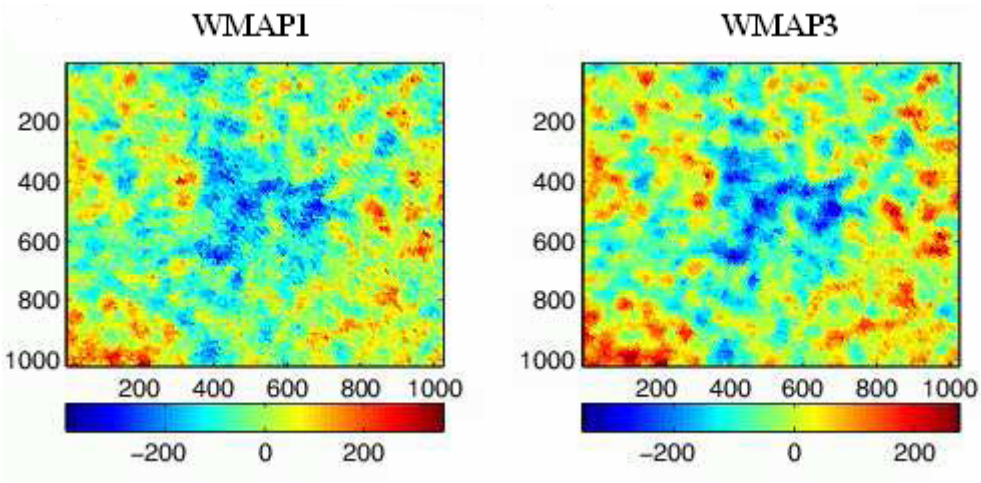

Figura 3.3 - Região do mapa combinado das bandas Q, V e W centrada no *Cold Spot* para o WMAP1 (figura da esquerda) e WMAP3 (figura da direita). A escala de temperatura das figuras, representada pelos retângulos, está em μK. A resolução das imagens, que está definida nos eixos das ordenadas e abscissas, é 1024 pixels $\times$ 1024 pixels

Fonte: adaptado de Cruz et al. (2007).

esteja relacionada com uma manisfestação local do efeito SWI causado por um supervazio na direção do *Spot*. Vários autores sugerem ainda mudança no modelo cosmológico. Por exemplo, defeitos topológicos produzidos no universo primordial poderiam gerar a mancha fria observada nos dados do WMAP (ver Cruz et al. (2008)).

3.4 Assimetria Norte-Sul

A assimetria Norte-Sul foi descoberta quando os estudos estavam focados no baixo valor das potências em grandes escalas angulares encontrado nos dados do WMAP. Eriksen et al. (2004) analisaram os dados do WMAP em escalas angulares maiores que 3° e encontraram uma clara assimetria entre os hemisférios norte e sul galácticos. A Figura 3.4 mostra o espectro de potência para baixos multipolos e evidencia a diferença de potência entre os hemisférios sul e norte.

Eriksen et al. (2004), também, encontraram a assimetria em coordenadas eclípticas. O hemisfério norte galáctico (e eclíptico) possui baixa potência em grandes escalas angulares enquanto o hemisfério sul possui maior concordância com o MCP. Nesse estudo, a probabilidade de ocorrência da falta de potência do hemisfério norte, supondo que o modelo ΛCDM esteja correto, foi calculada como sendo menor que 0,02%. Para fins de comparação, os dados do COBE foram analisados e as assimetrias também estavam presentes nesses dados. Assimetrias semelhantes foram encontradas entre os hemisférios oeste e leste galácticos. Estudos posteriores mostraram que a máxima assimetria é encontrada

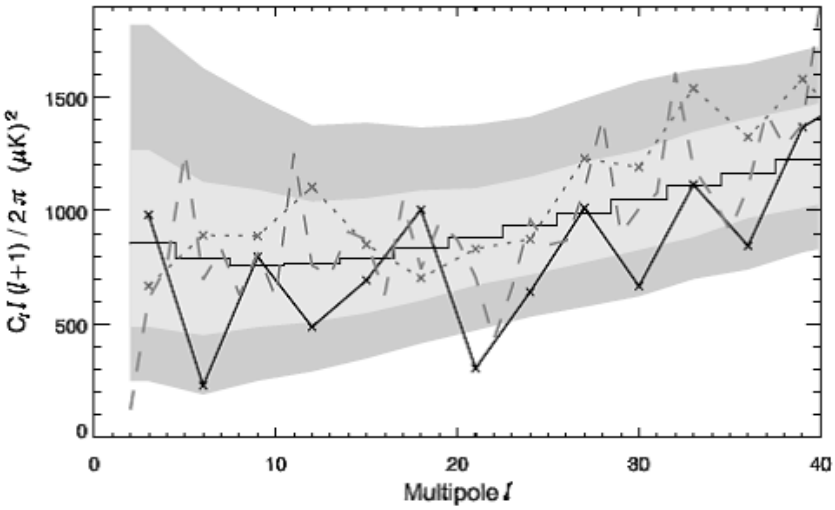

Figura 3.4 - A curva sólida (histograma) se refere ao espectro de potência do modelo ΛCDM. A curva tracejada mostra o espectro de potência obtido quando a máscara kp2 é utilizada. As curvas ligadas pelos 'x' cinzas e pretos são os espectros estimados para os mapas combinados das bandas V e W do WMAP do hemisfério sul e norte respectivamente. As áreas sombreadas indicam os erros de 1σ e 2σ, levando em consideração o modelo ΛCDM.

Fonte: Eriksen et al. (2004)

para hemisférios centrados perto dos pólos eclípticos (HANSEN et al., 2004).

Assim como para as outras anomalias citadas nesse capítulo, uma explicação para a assimetra norte-sul nos dados do WMAP ainda não foi encontrada. Algumas soluções consideradas já foram, contudo, descartadas. A influência de erros sistemáticos e de *foregrounds* não é mais considerada significante, pois a assimetria independe da freqüência analisada e do corte galáctico utilizado (ERIKSEN et al., 2005). Bernui et al. (2006) mostraram também que a assimetria norte-sul não está relacionada com o baixo valor do quadrupolo. Algumas outras hipóteses foram testadas, como, por exemplo, a influência de campos magnéticos primordiais na existência da assimetria. Os estudos mostraram que quanto maior esse campo magnético maior é a probabilidade da assimetria norte-sul ocorrer (BERNUI; HIPÓLITO-RICALDI, 2008).

Nesse trabalho, a assimetria Norte-Sul será investigada com os dados do WMAP5 e WMAP3. Outras assimetrias também serão procuradas nos dados e, para isso, serão feitas análises por quadrantes. Por fim, veremos, se as assimetrias são anômalas através da metodologia detalhada no próximo capítulo. É importante salientar que assimetrias estão presentes nos dados ou em mapas simulados, todavia queremos saber se a probabilidade dessas assimetrias encontradas nos dados ocorrerem no modelo está abaixo de 5% e, portanto, se devem ser consideradas anômalas.

4 METODOLOGIA

Nesse trabalho, serão utilizados 5 mapas de multifreqüências encontrados na literatura e que estão listados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Mapas de multifreqüências

Mapa	Referência
ILC5	Gold et al. (2008)
HILC5	Kim et al. (2008)
ILC3	Bennett et al. (2003c)
SILC3	Park et al. (2007)
Oliveira-Costa3	Oliveira-Costa e Tegmark (2006)

Os mapas de multifreqüências possuem contaminação residual, portanto foi necessária a utilização de cortes na análise. Nesse trabalho foi utilizado um corte Galáctico de $|b| < 10°$ mais a máscara KQ85, produzindo um corte total de aproximadamente 22% do céu.

O objetivo desse trabalho é analisar esses mapas primeiramente por hemisférios. Os hemisférios foram escolhidos de acordo com os hemisférios previamente utilizados na literatura. A Figura 4.1 ilustra os hemisférios norte e sul utilizados, já com o corte Galáctico descrito anteriormente. A finalidade desse estudo é investigar a assimetria Norte-Sul nos dados do WMAP5 e compará-la à assimetria já encontrada no WMAP3 utilizando o mesmo método de análise.

Para verificar a existência da assimetria Norte-Sul, comparamos o hemisfério sul com o hemisféro norte tanto nos mapas de RCFM quanto nos mapas previstos pelo modelo cosmológico utilizado. Em seguida, comparamos a assimetria encontrada entre os hemisférios, nos dados e no modelo, com o intuito de calcular a probabilidade de ocorrência da assimetria Norte-Sul na RCFM considerando um modelo cosmológico. A partir do cálculo dessa probabilidade, é possível saber se a assimetria Norte-Sul no mapa da RCFM é considerada anômala.

A próxima análise, por quandrantes, tem a finalidade de buscar por novas assimetrias anômalas nos dados da RCFM. Os quadrantes estudados nos mapas foram escolhidos baseando-se nos hemisférios utilizados para investigar a assimetria Norte-Sul e podem ser vistos na Figura 4.2. Mais uma vez, as assimetrias foram investigadas para os dados do WMAP5 e WMAP3, para fins de comparação. Os quadrantes dos mapas da RCFM foram, então, comparados entre si na busca por assimetrias. Encontradas as assimetrias mais significativas, elas foram, também, procuradas nos mapas do modelo. Em seguida, o

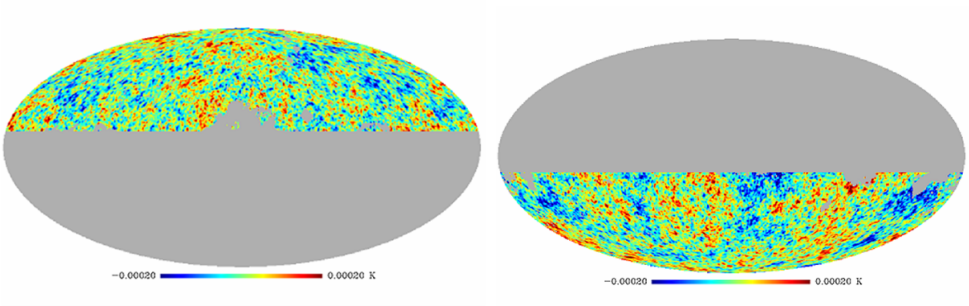

Figura 4.1 - Hemisférios norte e sul do mapa ILC5, já com os cortes KQ85 + $|b| < 10°$

cálculo da probabilidade dessas assimetrias significativas encontradas nos dados ocorrerem no modelo proporciona saber se elas são anômalas.

Na tentativa de explicar as assimetrias que foram encontradas por quadrantes, 3 hipóteses que poderiam estar causando as assimterias foram verificadas: a influência do *Cold Spot*, do alinhamento entre o quadrupolo e do octopolo e da máscara assimétrica KQ85 utilizada.

Para testar a primeira hipótese, o *Cold Spot*, que aparece nos mapas da RCFM assim como as assimetrias por quadrantes, também foi procurado nos mapas do modelo nos quais as assimetrias por quandrantes estão presentes, por meio da construção de histogramas de variações de temperatura centrados nas coordenadas do *Cold Spot*. O histograma da região selecionada para o mapa da RCFM tem propriedades estatíticas bem definidas que caracterizam a Mancha Fria. Essas características serão comparadas com as características estatísticas dos histogramas dos mapas considerados do modelo. A idéia desse procedimento é relacionar a assimetria por quadrantes ao *Cold Spot*, caso essas duas características sejam encontradas simultaneamente em mapas do modelo.

Da mesma forma, a segunda hipótese foi testada. Os mapas relacionados ao quadrupolo, octopolo e quadrupolo + ocotopolo foram obtidos dos mapas do modelo que possuem a assimetria por quadrantes. Por fim, procuramos, de forma qualitativa, por alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo nesses mapas, como ocorre nos mapas da RCFM.

Para testar a terceira hipótese, o procedimento realizado para encontrar as assimetrias por quadrantes nos dados e suas respectivas probabilidades de ocorrência no modelo, utilizando a máscara KQ85 e o corte Galáctico $|b| < 10°$, foi refeito somente com o corte Galáctico $|b| < 10°$. Por fim, as probabilidades foram comparadas para os dois casos, com a máscara e sem a máscara.

O método escolhido para estudar as assimetrias na distribuição angular da RCFM foi a função de correlação de dois pontos. Para o estudo das possíveis anomalias existentes nos

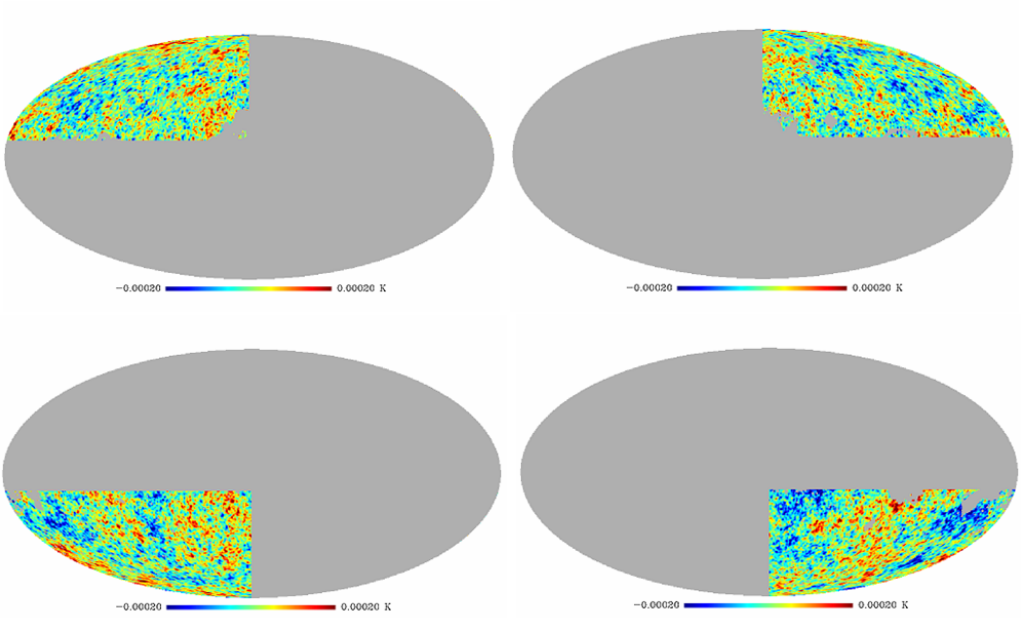

Figura 4.2 - Os quadrantes que foram utilizados na análise, já com os cortes KQ85 + $|b| < 10°$

mapas da RCFM foi preciso comparar os resultados obtidos com os resultados previstos por um modelo cosmológico. Com esse propósito, foram feitas simulações Monte Carlo. Nas próximas seções, detalharemos como a função de correlação de dois pontos é definida e como as simulações Monte Carlo foram geradas.

4.1 Função de correlação de dois pontos

A função de correlação de dois pontos mede a correlação angular das flutuações de temperatura distribuídas na esfera celeste e é definida como sendo:

$$c(\gamma) \equiv \langle T(\mathbf{n_p}) \cdot T(\mathbf{n_q}) \rangle, \tag{4.1}$$

sendo que $T(\mathbf{n_p})$ e $T(\mathbf{n_q})$ são as flutuações de temperatura nos pixels p e q respectivamente e γ é o ângulo entre os dois pixels.

De acordo com a definição de produto interno teremos $\mathbf{n_p} \cdot \mathbf{n_q} = |\mathbf{n_p}||\mathbf{n_q}| \cos\gamma$, sendo $\mathbf{n_p}$ e $\mathbf{n_q}$ versores que definem a direção de cada pixel. Dessa forma $\cos\gamma = \mathbf{n_p} \cdot \mathbf{n_q}$.

Contudo, o pixel p é dado pelas coordenadas θ_p e ϕ_p e o pixel q é dado pelas coordenadas θ_q e ϕ_q, sendo que $0° \leq \phi \leq 360°$ e $-90° \leq \theta \leq 90°$. Teremos, portanto, a relação:

$$\cos\gamma = \cos\theta_p \cos\theta_q + \sin\theta_p \sin\theta_q \cos(\phi_p - \phi_q). \tag{4.2}$$

No desenvolvimento dos programas computacionais para realização desse trabalho foi utilizada a Equação 4.1, pois é uma equação geral e válida também na análise de mapas nos quais cortes foram feitos. Alguns testes foram feitos para mapas de céu inteiro e, nesse caso, para um universo isotrópico, existe uma equação equivalente para a função de correlação de dois pontos que foi utilizada no trabalho. Para a obtenção dessa equação fazemos, com $i = p, q$,

$$T(\mathbf{n_i}) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^{l} a_{lm} Y_{lm}(\theta_i, \phi_i), \tag{4.3}$$

e pela definição de um universo isotrópico, o espectro C_l é dado por

$$C_l \equiv \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{l} |a_{lm}|^2. \tag{4.4}$$

O polinômio de Legendre de ordem l para o ângulo γ pode ser escrito em termos dos produtos dos harmônicos esféricos dos ângulos θ_p, ϕ_p e θ_q, ϕ_q:

$$P_l(\cos\gamma) = \frac{4\pi}{2l+1} \sum_{m=-l}^{l} Y_{lm}(\theta_p, \phi_p) Y^{\star}_{lm}(\theta_q, \phi_q), \tag{4.5}$$

sendo $Y^{\star}_{lm}(\theta_q, \phi_q)$ o conjugado complexo de $Y_{lm}(\theta_p, \phi_p)$. Assim, utilizando as Equações 4.3, 4.4 e 4.5, calculamos a função de correlação de dois pontos para mapas do céu inteiro em um universo isotrópico:

$$\langle T(\mathbf{n_p}) \cdot T(\mathbf{n_q}) \rangle = \frac{1}{4\pi} \sum_{l=2}^{\infty} (2l+1) C_l P_l(\cos\gamma). \tag{4.6}$$

4.2 Simulações Monte Carlo

Com a finalidade de analisar os resultados obtidos para os mapas da RCFM, deve-se compará-los com os resultados esperados por um modelo cosmológico. Como o MCP está atualmente bem sustentado pelas observações, ele será o modelo base utilizado nesse

trabalho. O primeiro passo, então, é gerar mapas simulados das flutuações de temperatura da RCFM assumindo que o modelo ΛCDM esteja correto.

Para gerar as simulações Monte Carlo foram utilizadas rotinas do HEALPix (*Hierarchical Equal Area and isoLatitude Pixelization*). O HEALPix é um sistema que divide a esfera celeste em quadriláteros de mesma área. O menor número possível de pixels é 12 e corresponde a menor resolução angular da esfera. Os pixels dessa resolução base podem ser subdivididos de acordo com o parâmetro de resolução N_{side}, sendo que o número de pixels N é dado por $N = 12 \times N_{side}^2$. Quanto maior o N_{side}, que varia de 1 até 1024, melhor a resolução da esfera (GóRSKI et al., 1999; GóRSKI et al., 2005). O HEALpix é usado tanto para gerar mapas simulados como para visualizar e manipular os dados da RCFM.

Foram geradas 3000 simulações com $N_{side} = 256$, que possui uma resolução angular de pixel de $14'$. O multipolo l máximo utilizado nos mapas simulados foi 767. A obtenção da correlação de dois pontos por hemisférios, que será descrita no próximo capítulo, foi realizada para mapas degradados com $N_{side} = 32$ e com $l_{max} = 180$. Na análise por quadrantes, os mapas foram degradados para $N_{side} = 64$ e $l_{max} = 180$.

Os espectros, $C_l s$, utilizados foram obtidos do melhor ajuste dos dados do WMAP5 ao modelo ΛCDM e estão disponíveis no *site* LAMBDA[1]. Com a finalidade de testar algumas hipóteses e para obter uma análise mais detalhada, os valores do quadrupolo e do octopolo foram modificados em 2000 simulações, como mostrado na Tabela 4.2. Dessa forma, os mapas simulados foram divididos em 3 grupos cada um contendo 1000 realizações.

Tabela 4.2 - Potências do quadrupolo, do octopolo e do hexadecupolo

Grupos	$C_2(\mu K^2)$	$C_3(\mu K^2)$	$C_4(\mu K^2)$
1	1263,5590	583,2365	323,9751
2	323,9751	323,9751	323,9751
3	223,0531	544,0191	323,9751

O grupo 1 refere-se ao modelo ΛCDM sem alterações. No grupo 2, alteramos o modelo ΛCDM de forma que $C_2 = C_3 = C_4 = 323,9751 \mu K^2$ e no grupo 3 os valores de C_2 e C_3 são os mesmos que os observados nos dados do WMAP5. A Figura 4.3 mostra o espectro de potência angular para $l \leq 30$ para cada um dos 3 grupos de simulações. A construção de mapas com diferentes valores do quadrupolo e do octopolo visa saber qual a influência desses valores na presença das assimetrias Norte-Sul e por quadrantes da RCFM que serão estudadas no próximo capítulo.

[1] http://lambda.gsfc.nasa.gov

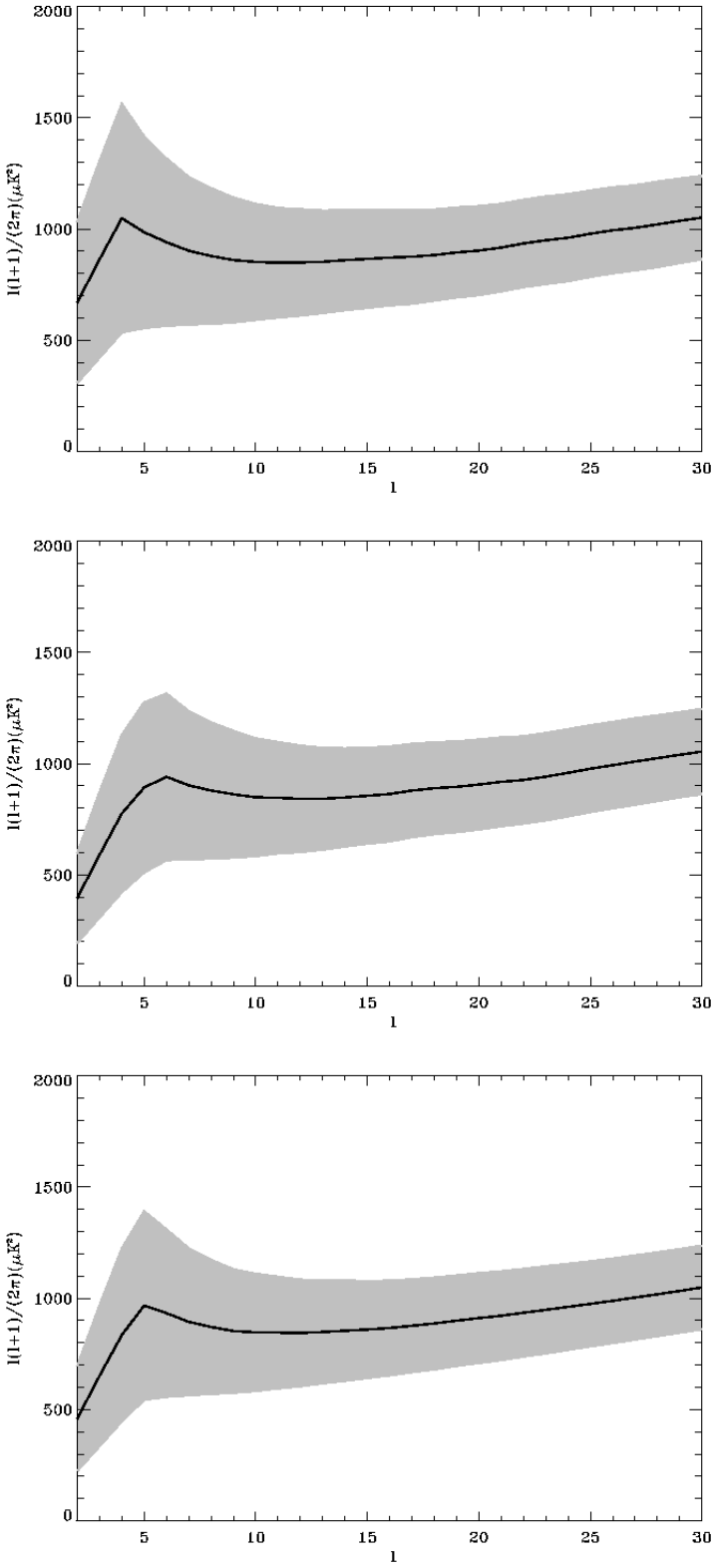

Figura 4.3 - Nos espectros de potência acima, a curva continua é a média e a área sombreada está relacionada ao desvio padrão das 1000 simulações para cada grupo. De cima para baixo: espectro de potência do grupo 1 (ΛCDM), grupo 2 ($C_2 = C_3 = C_4 = 323,9751\mu K^2$) e grupo 3 ($C_2 = C_2WMAP$ e $C_3 = C_3WMAP$).

5 RESULTADOS

Os programas que calculam a função de correlação de dois pontos foram desenvolvidos e testados utilizando o *software Interactive Data Language* (IDL). Foram realizados testes em mapas de céu inteiro com a Equação 4.1 e 4.7 com a finalidade de ajustar os programas. A análise qualitativa de como o número de *bins* interfere no cálculo da função de correlação também foi feita. Os números de *bins* utilizados foram 60, 90, 150, 180, 270 e 360. O número de *bins* escolhido para a confecção dos gráficos foi $N_{bins} = 90$, pois propiciou a obtenção de resultados mais satisfatórios. Apesar de sempre haver ruído estatístico, ele foi minimizado para $N_{bins} = 90$.

Como detalhado no Capítulo 4, as funções foram obtidas para os mapas de multifreqüências ILC 5 anos, ILC 3 anos e outros mapas de RCFM, nos quais os *foregrounds* foram removidos por diferentes métodos: o HILC 5 anos, o Oliveira-Costa 3 anos e o SILC 3 anos. Como mencionado anteriormente, além da máscara KQ85 que elimina as partes do céu dominadas por contaminação da Galáxia e por fontes pontuais, foi feito o corte Galáctico de $|b| < 10°$. O segundo corte serve para que o cálculo da função de correlação de dois pontos possa convergir de forma mais suave para zero, o que não acontece somente com a utilização da máscara devido a sua assimetria.

5.1 Análise por hemisférios

Na análise por hemisférios, a função de correlação de dois pontos foi calculada para os mapas com $N_{side} = 32$, que corresponde a 12288 pixels. Devido ao corte, 9649 pixels ficaram disponíveis para análise, sendo cada pixel um quadrilátero de 2° de lado. As curvas foram obtidas para o hemisfério sul e para o hemisfério norte como mostrado na Figura 5.1. Devido a grande quantidade de ruído, as curvas foram suavizadas, utilizando a função *smooth* do IDL, para facilitar a visualização dos gráficos. Essa suavização foi feita somente de forma ilustrativa, não sendo utilizada, portanto, na obtenção dos resultados.

Para estudar as curvas obtidas, utilizamos uma quantidade na qual pudéssemos caracterizá-las, definida em Bernui et al. (2006),

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_{bins}} \sum_{i=1}^{N_{bins}} f_i^2}, \tag{5.1}$$

sendo que f_i corresponde à função de correlação de dois pontos para cada *bin* i. Durante os testes realizados, as curvas também foram quantificadas utilizando σ^2, não havendo mudanças significativas nos resultados que serão mostrados. Não era esperado, de fato,

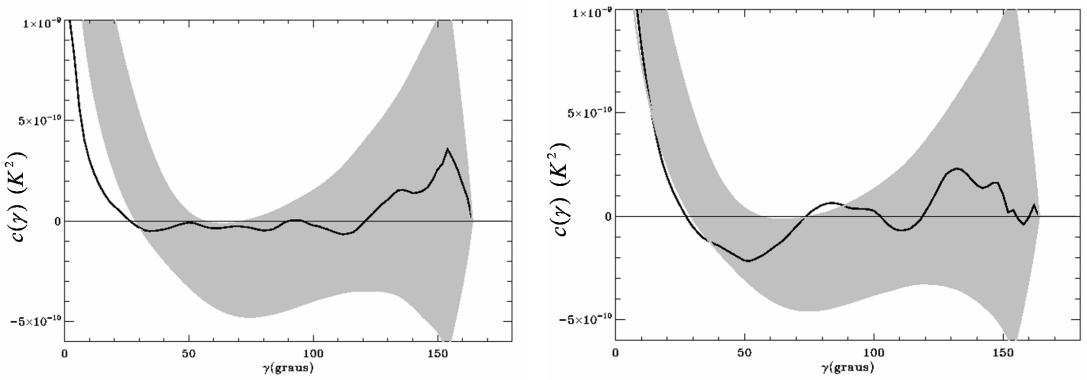

Figura 5.1 - As figuras da esquerda e da direita mostram as curvas obtidas com a função de correlação de dois pontos do mapa ILC5 para o hemisfério norte e sul respectivamente. A parte sombreada é o desvio padrão dos hemisférios para as 1000 simulações do grupo 1.

que a maneira como as curvas são quantificadas alterasse os resultados obtidos.

A diferença entre as potências do hemisfério norte e hemisfério sul foram calculadas fazendo σ_{HS}/σ_{HN} para os mapas da RCFM. Finalmente, esses valores foram comparados com os valores obtidos para cada um dos grupos de simulações Monte Carlo. Para as 1000 simulações do modelo ΛCDM sem alterações (grupo 1) $\sigma_{HS}/\sigma_{HN} = 1,0^{+0,65}_{-0,4}$. Os erros foram calculados a partir do desvio padrão levando em consideração as 1000 simulações, sendo usada a regra de propagação de erros para a divisão. Os valores de σ_{HS}/σ_{HN} foram também calculados para cada mapa da RCFM e suas respectivas probabilidades de ocorrência nas simulações do grupo 1 que podem ser vistos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Probabilidades calculadas para o grupo 1 de simulações Monte Carlo.

Mapa	σ_{HS}/σ_{HN}	Probabilidade
ILC5	1,7	7,7%
HILC5	1,8	5,6%
ILC3	1,7	7,7%
SILC3	1,9	4,0%
Oliveira-Costa3	1,7	7,7%

Os resultados obtidos para o WMAP5 concordam com os resultados do WMAP3 para todos os mapas. As probabilidades de ocorrência da assimetria norte-sul no modelo ΛCDM variam de 4,0% a 7,7%. Levando-se em conta a média simples dessas probabilidades encontramos 6,6%, o que nos permite concluir que a assimetria norte-sul não é anômala de acordo com a definição do Capítulo 3, apesar de sua probabilidade de ocorrência ser bastante baixa.

A mesma análise foi feita para as simulações do grupo 2 e 3, como pode ser visto nas Tabelas 5.2 e 5.3 respectivamente. Nesses casos $\sigma_{HS}/\sigma_{HN} = 1,0^{+0,4}_{-0,3}$ para o grupo 2 e $\sigma_{HS}/\sigma_{HN} = 1,0^{+0,5}_{-0,3}$ para o grupo 3. Como esperado, na média, para qualquer grupo de simulações, σ_{HS}/σ_{HN} se aproxima de 1 , ou seja, a diferença de potência entre os hemisférios norte e sul tende a ser mínima. Para todos os mapas analisados a quantidade σ_{HS}/σ_{HN} está fora do desvio padrão, considerando cada 1000 simulações.

Tabela 5.2 - Probabilidades calculadas para o grupo 2 de simulações Monte Carlo.

Mapa	σ_{HS}/σ_{HN}	Probabilidade
ILC5	1,7	4,2%
HILC5	1,8	3,2%
ILC3	1,7	4,2%
SILC3	1,9	2,4%
Oliveira-Costa3	1,7	4,2%

Para as modificações nos valores do quadrupolo e do octopolo realizadas, as mudanças nas probabilidades de ocorrência da assimetria para cada mapa em cada grupo de simulações (Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3) não são muito significativas: 2% na média. Além disso, considerando valores menores do quadrupolo e do octopolo que no modelo ΛCDM (grupos 2 e 3), a probabilidade da assimetria ocorrer diminui ainda mais para todos os mapas (em ambos os casos a média fica em 3,6%). Esse resultado mostra que um baixo valor do quadrupolo e do octopolo no modelo não explica a baixa probabilidade da assimetria ser encontrada.

Tabela 5.3 - Probabilidades calculadas para o grupo 3 de simulações Monte Carlo.

Mapas	σ_{HS}/σ_{HN}	Probabilidades
ILC5	1,7	4,3%
HILC5	1,8	2,7%
ILC3	1,7	4,3%
SILC3	1,9	2,6%
Oliveira-Costa3	1,7	4,3%

A análise feita por hemisférios confirma os resultados já existentes na literatura, os quais levam em consideração apenas o grupo 1 de simulações Monte Carlo, para o WMAP1 e WMAP3. Uma análise mais aprofundada será feita na próxima seção no estudo de assimetrias por quadrantes.

5.2 Análise por quadrantes

Na análise por quadrantes, a função de correlação de dois pontos foi calculada para os mapas com $N_{side} = 64$, que corresponde a 49152 pixels, sendo o pixel um quadrilátero de 1° de lado. Devido ao corte, 38027 pixels ficaram disponíveis para análise. As curvas foram obtidas para o Quadrante Inferior Direito (QID), Quadrante Inferior Esquerdo (QIE), Quadrante Superior Direito (QSD) e Quadrante Superior Esquerdo (QSE) como mostrado na Figura 5.2. Essas curvas também foram suavizadas de forma puramente ilustrativa.

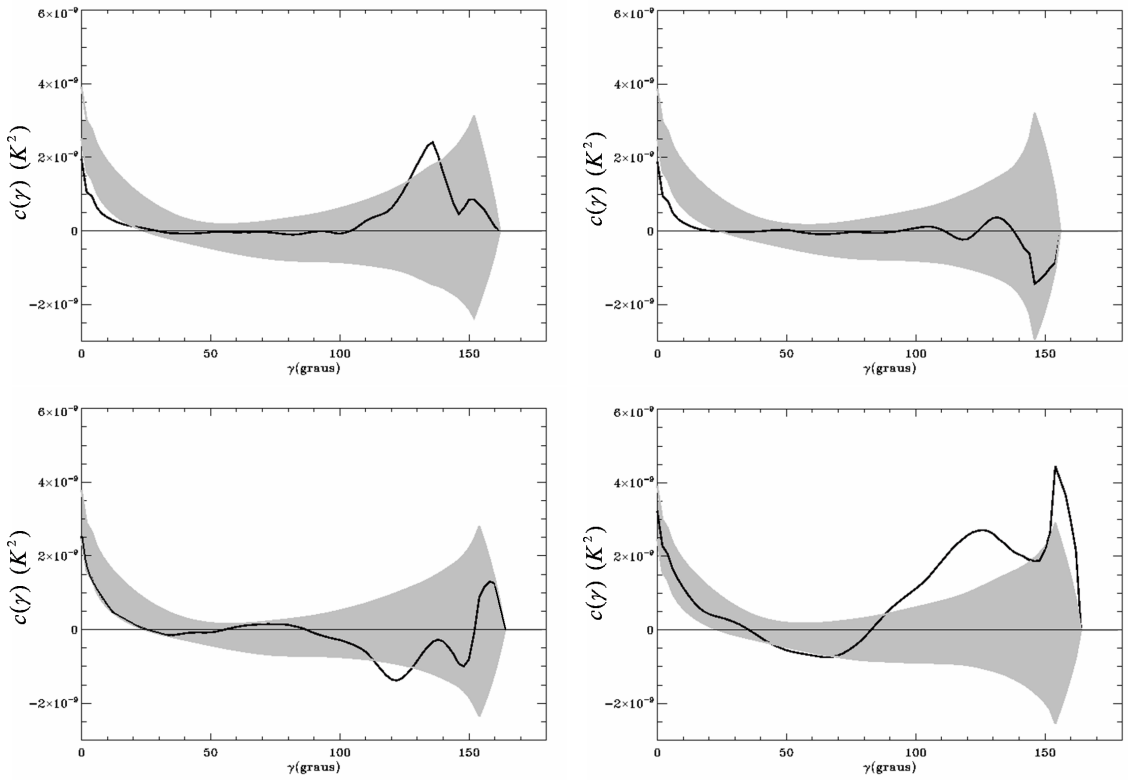

Figura 5.2 - As figuras da esquerda, de cima para baixo, mostram as curvas obtidas com a função de correlação de dois pontos do mapa ILC5 para o QSE e QSD, respectivamente. Da mesma forma, para as figuras da direita, de cima para baixo, as curvas foram obtidas para o QIE e QID, respectivamente. A parte sombreada é o desvio padrão dos quadrantes para as 1000 simulações do grupo 1.

Da mesma forma que foi feito para os hemisférios, as curvas obtidas para os quadrantes foram quantificadas utilizando a Equação 5.1. Foi encontrada uma assimetria do QID com relação aos outros quadrantes. A probabilidade dessa assimetria acontecer foi calculada para cada um dos três grupos de simulações. As Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 resumem os resultados obtidos.

Tabela 5.4 - Probabilidades calculadas para o grupo 1 de simulações Monte Carlo.

Mapa	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QIE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSD}$	Prob.
ILC5	2,4	7,2%	2,3	6,5%	3,3	2,4%
HILC5	1,9	14,1%	2,1	9,1%	1,8	15,5%
ILC3	2,5	6,6%	2,5	4,9%	3,2	2,7%
SILC3	2,9	3,5%	2,5	4,9%	4,0	1,1%
Oliveira-Costa3	2,6	5,0%	2,6	3,8%	2,1	9,5%

A assimetria QID-QSD é a mais pronunciada no mapa ILC5 para as simulações do grupo 1. Porém, a probabilidade de ocorrência das três assimetrias em qualquer um dos mapas é bastante baixa. Na análise por quadrantes, a mudança no valor do quadrupolo e do octopolo (simulações do grupo 2 e 3) não produz variações significativas nas probabilidades das assimetrias ocorrerem.

Tabela 5.5 - Probabilidades calculadas para o grupo 2 de simulações Monte Carlo.

Mapa	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QIE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSD}$	Prob.
ILC5	2,4	6,7%	2,3	6,0%	3,3	2,5%
HILC5	1,9	13,7%	2,1	8,2%	1,8	13,0%
ILC3	2,5	5,9%	2,5	4,1%	3,2	3,0%
SILC3	2,9	3,3%	2,5	4,1%	4,0	1,0%
Oliveira-Costa3	2,6	5,3%	2,6	3,5%	2,1	9,6%

Algumas características interessantes podem ser vistas analisando as probabilidades encontradas para cada um dos grupos de simulações. Os resultados obtidos para os mapas ILC5, ILC3 e SILC3 concordam bem entre si, porém os resultados para os mapas HILC5 e Oliveira-Costa3 apresentam uma pequena divergência com relação aos outros. Os quadrantes de todos mapas foram comparados com os respectivos quadrantes do mapa ILC5 na procura por quadrantes pouco correlacionados, o que poderia explicar a divergência em alguns resultados. Todavia, a menor correlação encontrada foi de 94% entre os QIE, QSD e QSE do mapa Oliveira-Costa3 e os respectivos quadrantes do mapa ILC5. A maior correlação, como esperado, acontece entre os quadrantes do mapa ILC3 e ILC5 que é de aproximadamente 99%. Sabe-se, contudo, que os mapas HILC5 e Oliveira-Costa3 não são construídos da mesma forma que os outros mapas o que poderia ocasionar essa diferença nos resultados.

A Tabela 5.7 mostra os valores de $\sigma_{QID}/\sigma_{QSE}$, $\sigma_{QID}/\sigma_{QIE}$ e $\sigma_{QID}/\sigma_{QSD}$ para cada um dos três grupos de simulações. Mais uma vez, a maioria dos valores encontrados para as assimetrias nos dados está fora do desvio padrão para cada 1000 simulações.

Tabela 5.6 - Probabilidades calculadas para o grupo 3 de simulações Monte Carlo.

Mapa	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QIE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSD}$	Prob.
ILC5	2,4	8,2%	2,3	6,8%	3,3	3,2%
HILC5	1,9	13,8%	2,1	9,1%	1,8	16,0%
ILC3	2,5	7,5%	2,5	5,6%	3,2	3,6%
SILC3	2,9	4,6%	2,5	5,6%	4,0	1,7%
Oliveira-Costa3	2,6	6,7%	2,6	4,9%	2,1	11,2%

Tabela 5.7 - Assimetrias nos três grupos de simulações Monte Carlo

Grupos	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSE}$	$\sigma_{QID}/\sigma_{QIE}$	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSD}$
1	$1,0^{+1,0}_{-0,5}$	$1,0^{+1,0}_{-0,5}$	$1,0^{+1,0}_{-0,5}$
2	$1,0^{+1,0}_{-0,5}$	$1,1^{+1,0}_{-0,5}$	$0,9^{+1,0}_{-0,5}$
3	$1,0^{+1,0}_{-0,5}$	$1,1^{+1,1}_{-0,5}$	$0,9^{+1,0}_{-0,5}$

O próximo passo após ter encontrado assimetrias ao analisar os quadrantes dos mapas da RCFM é investigar o que poderia ter causado essa assimetria. Nesse trabalho, investigamos três possibilidades: a presença do *Cold Spot* no QID, o alinhamento entre o quadrupolo e octopolo e a assimetria da máscara KQ85 utilizada na análise.

5.2.1 Influência do 'Cold Spot'

Para testar a hipótese de que o *Cold Spot* causa as assimetrias QID-QSE, QID-QIE e QID-QSD iremos construir histogramas de variações de temperatura centrados nas coordenadas do *Cold Spot* $(b, l) = (-57°, 209°)$. Esses histogramas foram construídos para o mapa ILC5 e para as realizações Monte Carlo que possuem as mesmas características do mapa ILC5. Procuraremos por 'semelhanças' estatísticas entre o histograma construído a partir dos dados e os histogramas construídos a partir das simulações. Nas figuras e tabelas que serão mostradas a seguir, as simulações serão chamadas de MC (que nesse caso significam simulações Monte Carlo), que variam de 1000 a 2000 para cada grupo.

Os histogramas foram contruídos com mapas de $N_{side} = 64$, $N_{bins} = 90$ e um raio de busca de 11°, o que totaliza 452 pixels. Como esperado, o histograma do mapa ILC5 (Figura 5.3) possui um desvio para variações de temperatura negativas, sendo que a variação média de temperatura na região encontrada foi de aproximadamente $-39\mu K$, o que caracteriza

a Mancha Fria. Em todos os histogramas mostrados nessa seção o eixo das abscissas corresponde as variações de temperatura da região selecionada e é dado em μK. O eixo das ordenadas está relacionado ao número de pixels da região selecionada que possui a variação de temperatura correspondente do eixo das absissas.

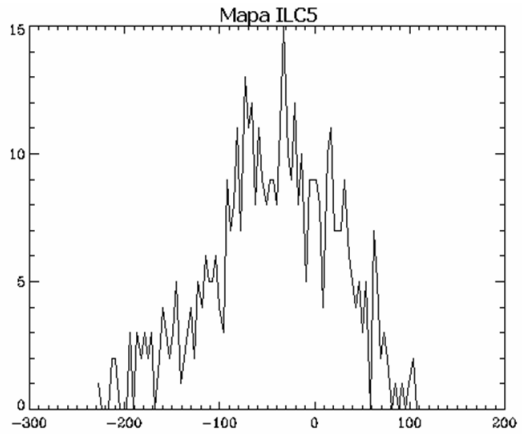

Figura 5.3 - Histograma de variações de temperatura do mapa ILC5 na região do *Cold Spot*.

Analisando o grupo 1 de simulações (modelo ΛCDM sem alterações), encontramos apenas 3 simulações em 1000 que possuem as três assimetrias por quadrantes simultaneamente como acontece no mapa ILC5. Esses três mapas podem ser considerados anômalos, devido à baixa probabilidade de ocorrerem (0,3%), e seus histogramas são mostrados na Figura 5.4.

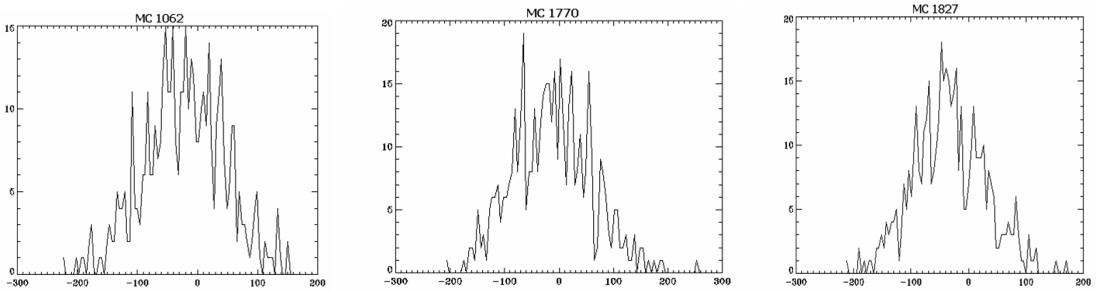

Figura 5.4 - Histogramas dos três mapas anômalos simulados do grupo 1.

O próximo passo é obter as características estatísticas dos três histogramas da Figura 5.4 e do histograma do mapa ILC5 para que possamos compará-las. As características obtidas foram: a média, variância, *skewness* e *kurtosis*. Procuraremos por semelhanças entre essas

características no mapa ILC5 e nas simulações analisadas, MC 1062, MC1770 e MC 1827 do grupo 1. A Tabela 5.8 permite que as comparações possam ser feitas.

Tabela 5.8 - Características dos histogramas das simulações anômalas do grupo 1

Mapa	Média (μK)	Variância	*Skewness*	*Kurtosis*
ILC5	-39,7636	4381,49	-0,302921	-0,283483
MC 1062	-17,4570	4641,19	-0,075748	-0,126208
MC 1770	-7,54838	5313,97	0,239183	-0,015189
MC 1827	-29,5830	3976,50	0,157679	-0,002849

Apesar de todos os mapas simulados possuirem histogramas com médias de variações de temperaturas negativas na região selecionada, as outras características levadas em consideração não seguem o padrão das do mapa ILC5. Não é possível concluir com segurança se os mapas simulados possuem uma mancha fria na região estudada ou não. Uma análise mais detalhada desses 3 mapas seria necessária. Para os outros grupos, 2 e 3, de simulações, as análises levam a uma conclusão diferente.

Para o grupo 2 e 3, o número de simulações que possuem todas as três assimetrias aumenta para 6 em 1000 e 16 em 1000, respectivamente. Apesar desse leve aumento, a probabilidade das assimetrias ocorrerem ainda é muito baixa para todos os grupos, variando de 0,3% até 1,6%. Da mesma forma que foi feito anteriormente, os histogramas foram construídos, primeiramente, para os 6 mapas do grupo 2 (Figura 5.5). Em seguida suas características estatísticas foram obtidas e comparadas com as do mapa ILC5, como pode ser visto na Tabela 5.9. O mesmo procedimento foi repetido para os 16 mapas anômalos do grupo 3, Figura 5.6 e Tabela 5.10.

Tabela 5.9 - Características dos histogramas das simulações anômalas do grupo 2

Mapa	Média (μK)	Variância	*Skewness*	*Kurtosis*
ILC5	-39,7636	4381,49	-0,302921	-0,283483
MC 1182	-16,7115	4654,63	0,009004	-0,577881
MC 1395	61,4199	4448,19	0,088471	-0,200927
MC 1505	30,9030	6431,86	0,118846	-0,256280
MC 1626	-56,2935	6860,09	0,051669	-0,325015
MC 1653	38,1368	4785,07	-0,140208	-0,398489
MC 1709	-20,5624	5193,30	0,004029	-0,307382

De acordo com os resultados obtidos para os grupos 2 e 3, concluimos que a presença do

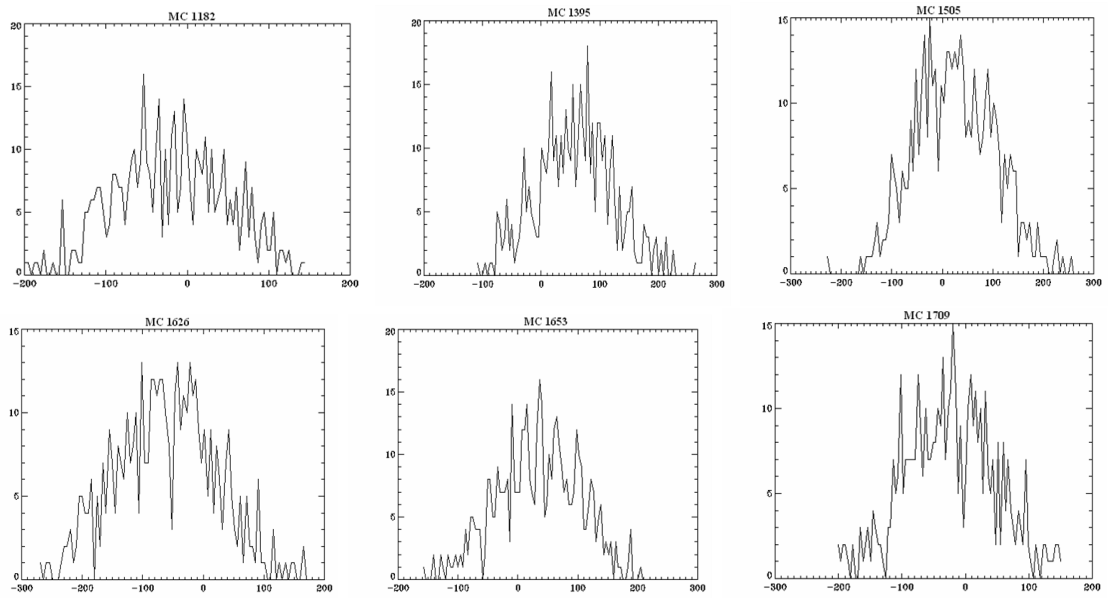

Figura 5.5 - Histogramas dos seis mapas anômalos simulados do grupo 2.

Cold Spot no mapa ILC5 não está relacionada com as assimetrias dos quadrantes. Analisando as Tabelas 5.9 e 5.10, vemos que alguns mapas simulados anômalos nos quadrantes não possuem as características da mancha fria na região de busca. A maioria dos mapas analisados do grupo 3 apresenta médias de variações de temperatura positiva na região. Mesmo que alguns mapas apresentem a mancha fria na região estudada, essa não é uma condição para que as assimetrias dos quadrantes aconteçam. Em resumo, o *Cold Spot* não causa as assimetrias nos quadrantes.

Como concluímos que o *Cold Spot* não é responsável pelas assimetrias encontradas nos quadrantes, testaremos outras hipóteses que a princípio poderiam causar ou contribuir para essas assimetrias. A próxima hipótese vincula o alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo às assimetrias QID-QSE, QID-QIE e QID-QSD e será detalhada na próxima subseção.

5.2.2 Influência do alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo

A hipótese investigada nessa subseção procura relacionar de forma qualitativa duas anomalias encontradas nos dados: o alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo e as assimetrias nos quadrantes. Para isso, foram analisados os mesmos 3 mapas simulados do grupo 1 e, como feito anteriormente, os 6 do grupo 2 e os 16 do grupo 3.

Para procurar pelo alinhamento entre o quadrupolo e o octopolo nos mapas analisados, separamos os mapas em multipolos: quadrupolo, octopolo e a soma desses dois multipolos.

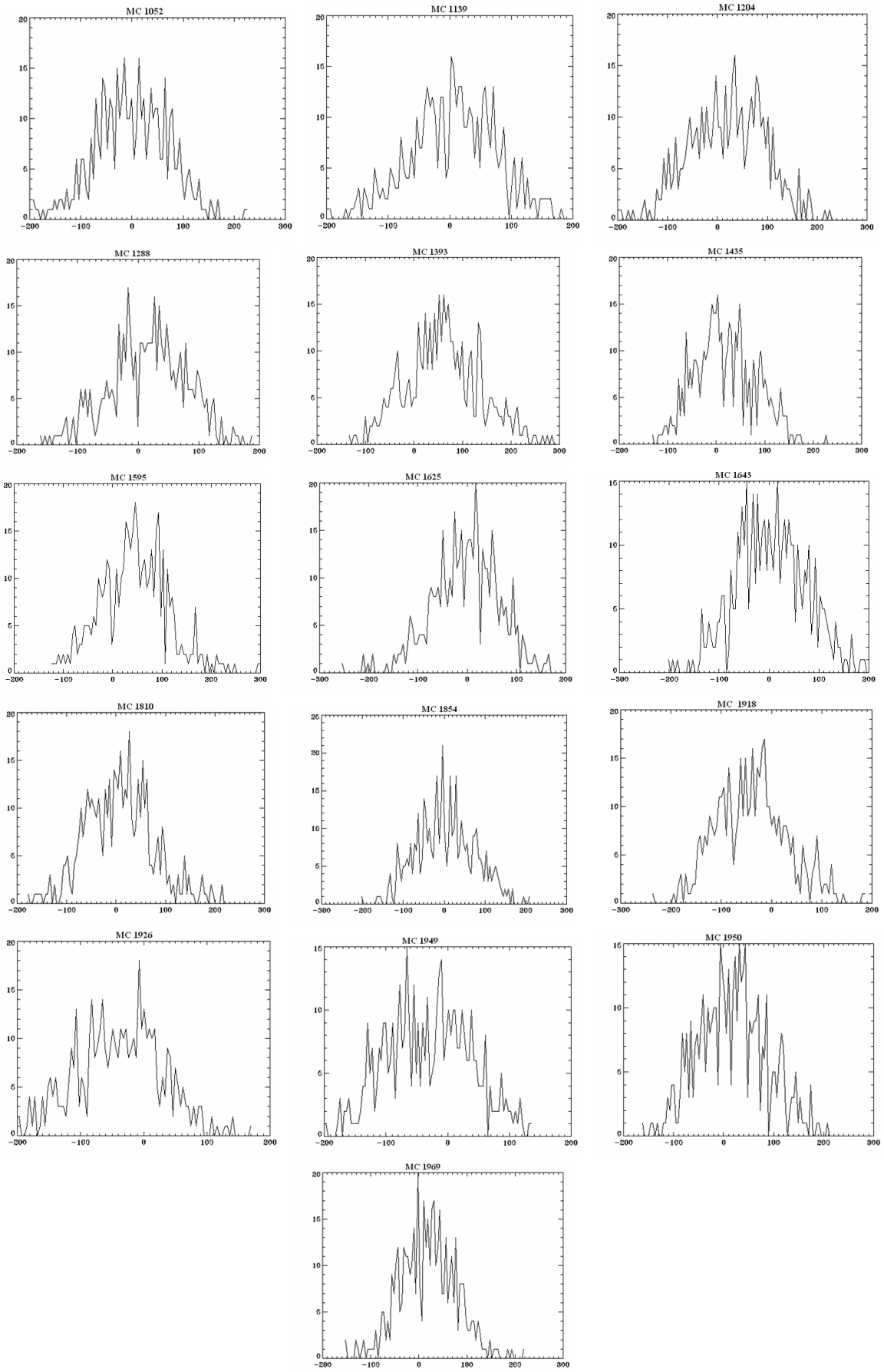

Figura 5.6 - Histogramas dos 16 mapas anômalos simulados do grupo 3.

Tabela 5.10 - Características dos histogramas das simulações anômalas do grupo 3

Mapa	Média (μK)	Variância	*Skewness*	*Kurtosis*
ILC5	-39,7636	4381,49	-0,302921	-0,283483
MC 1052	4,64898	5128,78	-0,020871	-0,056819
MC 1139	9,79106	4888,29	-0,107667	-0,235109
MC 1204	25,0089	5622,12	-0,064020	-0,382630
MC 1288	19,4824	413255	-0,158584	-0,278235
MC 1393	65.1010	6093.39	0,176677	-0,212561
MC 1435	22.5537	3964.69	0,231348	-0,399550
MC 1595	48.1031	4767.62	0,188175	0,211170
MC 1625	1.84881	4663.40	-0,316954	0,286767
MC 1643	8.85643	5046.26	0,017910	-0,215194
MC 1810	12.0152	4754.34	0,251179	0,197507
MC 1854	8.56450	5111.82	0,096991	-0,391468
MC 1918	-33.7468	5012.98	0,272590	-0,118215
MC 1926	-34.0167	4563.61	0,022986	-0,287991
MC 1949	-26.6564	4672.65	0,056120	-0,630550
MC 1950	21.5412	4723.93	0,153674	-0,341865
MC 1969	22.1655	3490.88	0,062585	0,146620

Foram utilizados os pacotes do HEALPix Anafast e Synfast. Os mapas foram obtidos para céu inteiro e podem ser vizualisados nas Figuras 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11.

Observando os mapas obtidos não encontramos nenhuma relação entre o alinhamento do quadrupolo e do octopolo e as assimetrias encontradas nos quadrantes para nenhum grupo de simulações.

5.2.3 Influência da máscara

Com a finalidade de testar se a máscara assimétrica estaria influenciando no resultado obtido, a função de correlação de dois pontos foi recalculada para os cinco mapas da RCFM utilizados anteriormente sem a utilização da máscara KQ85. Somente o corte $|b| < 10^{\circ}$ foi utilizado para evitar que contaminações residuais da galáxia afetassem os resultados, o que significa um corte de aproximadamente 17% do céu (40704 pixels ficaram disponíveis para análise). É importante salientar que os *foregrounds* causados por fontes pontuais, nesse caso, não foram excluídos. As curvas obtidas (suavizadas) somente como corte Galáctico $|b| < 10^{\circ}$ para o QID, QIE, QSD e QSE estão mostradas na Figura 5.12 e, podem ser comparadas com a Figura 5.2.

Da mesma forma, a função de correlação foi recalculada para as simulações Monte Carlo utilizando somente o corte $|b| < 10^{\circ}$. Porém, essa análise foi feita somente para simulações

do grupo 1, modelo ΛCDM sem alterações, devido ao grande trabalho computacional requerido. As Tabelas 5.11 e 5.12 resumem os resultados encontrados.

Tabela 5.11 - Probabilidades calculadas para o grupo 1 de simulações Monte Carlo.

Mapa	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QIE}$	Prob.	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSD}$	Prob.
ILC5	4,0	1,4%	4,0	0,6%	3,6	1,8%
HILC5	2,7	5,3%	3,3	1,3%	1,5	25,1%
ILC3	3,9	1,4%	4,0	0,6%	3,4	2,5%
SILC3	4,3	0,9%	3,9	0,6%	3,4	2,5%
Oliveira-Costa3	3,4	2,0%	3,8	0,6%	2,8	4,8%

É possível notar que mesmo sem a utilização da máscara as assimetrias encontradas anteriormente permanecem. Ao contrário do que se esperava, algumas assimetrias não só permanecem como são maximizadas, ou seja, a probabilidade das assimetrias ocorrerem diminuem nas simulações sem a utilização da máscara (comparar Tabelas 5.4 e 5.11). Para esse grupo de simulações (modelo ΛCDM sem alterações), não encontramos nenhuma simulação que possui as três assimetrias por quadrantes simultaneamente como acontece no mapa ILC5 e, portanto, a probabilidade das 3 assimetrias ocorrerem simultaneamente é

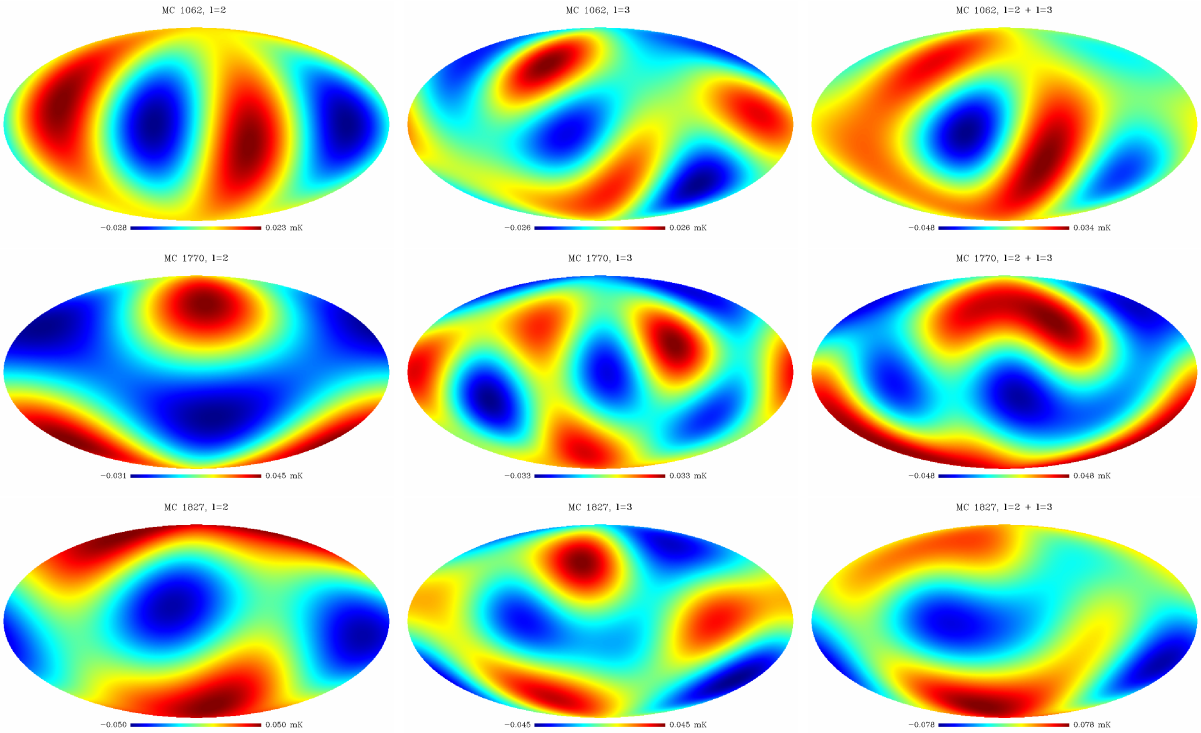

Figura 5.7 - Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) para as 3 simulações anômalas do grupo 1.

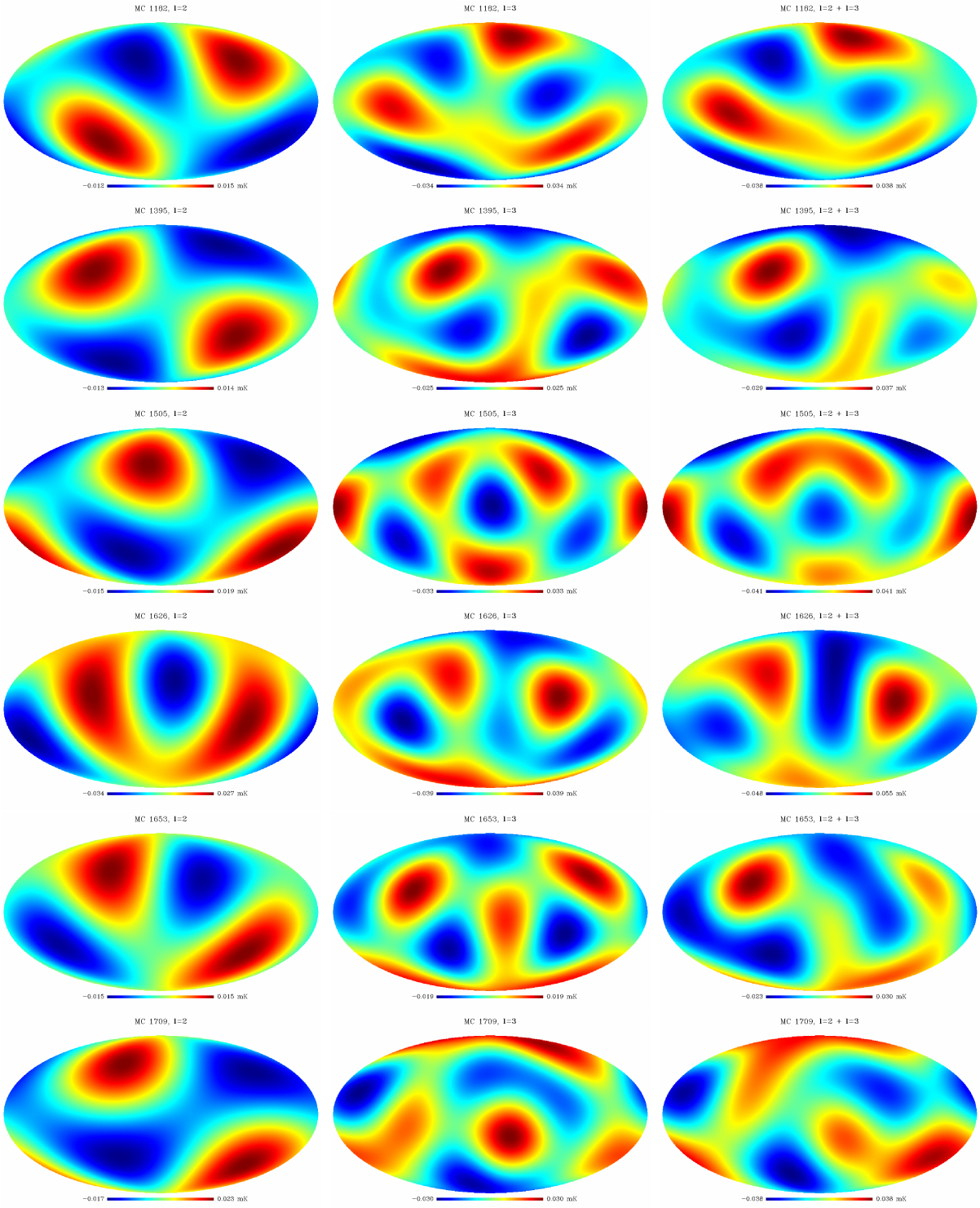

Figura 5.8 - Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) para as 6 simulações anômalas do grupo 2.

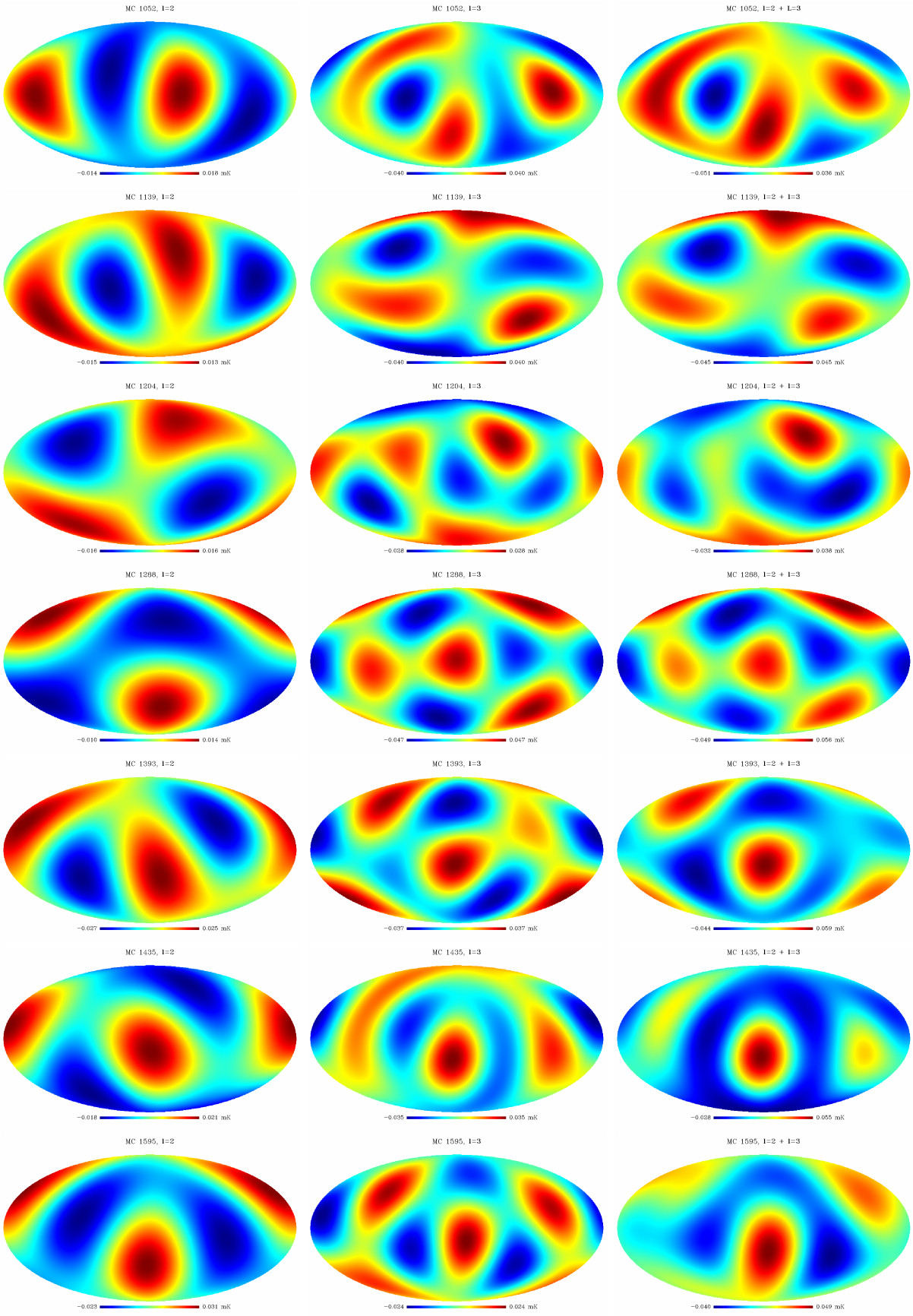

Figura 5.9 - Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) do MC 1052 até o MC 1595 do grupo 3.

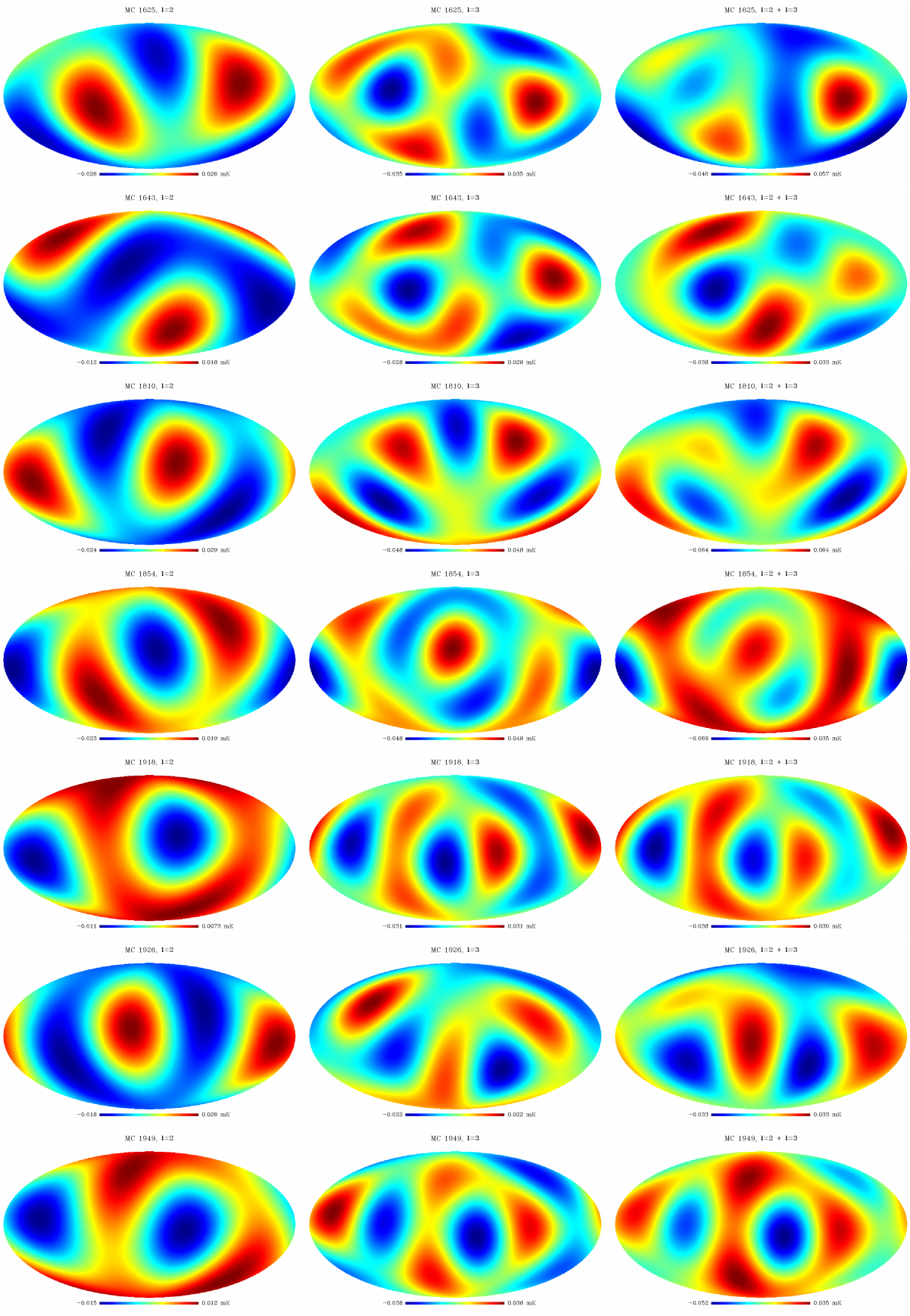

Figura 5.10 - Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) do MC 1625 até o MC 1949 do grupo 3.

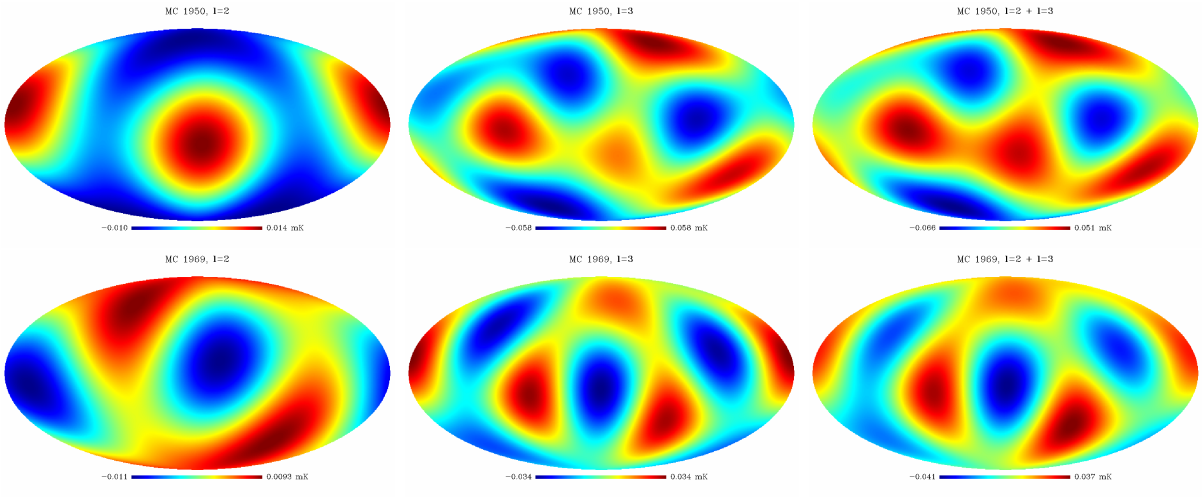

Figura 5.11 - Mapas do quadrupolo (primeira coluna), octopolo (segunda coluna) e quadrupolo + octopolo (terceira coluna) do MC 1950 até o MC 1969 do grupo 3.

menor que 0,1% quando a máscara não é utilizada.

Tabela 5.12 - Assimetrias para o grupo 1 de simulações Monte Carlo sem utilização da máscara KQ85

$\sigma_{QID}/\sigma_{QSE}$	$\sigma_{QID}/\sigma_{QIE}$	$\sigma_{QID}/\sigma_{QSD}$
$1,0^{+1,0}_{-0,5}$	$1,0^{+1,1}_{-0,5}$	$1,0^{+1,0}_{-0,5}$

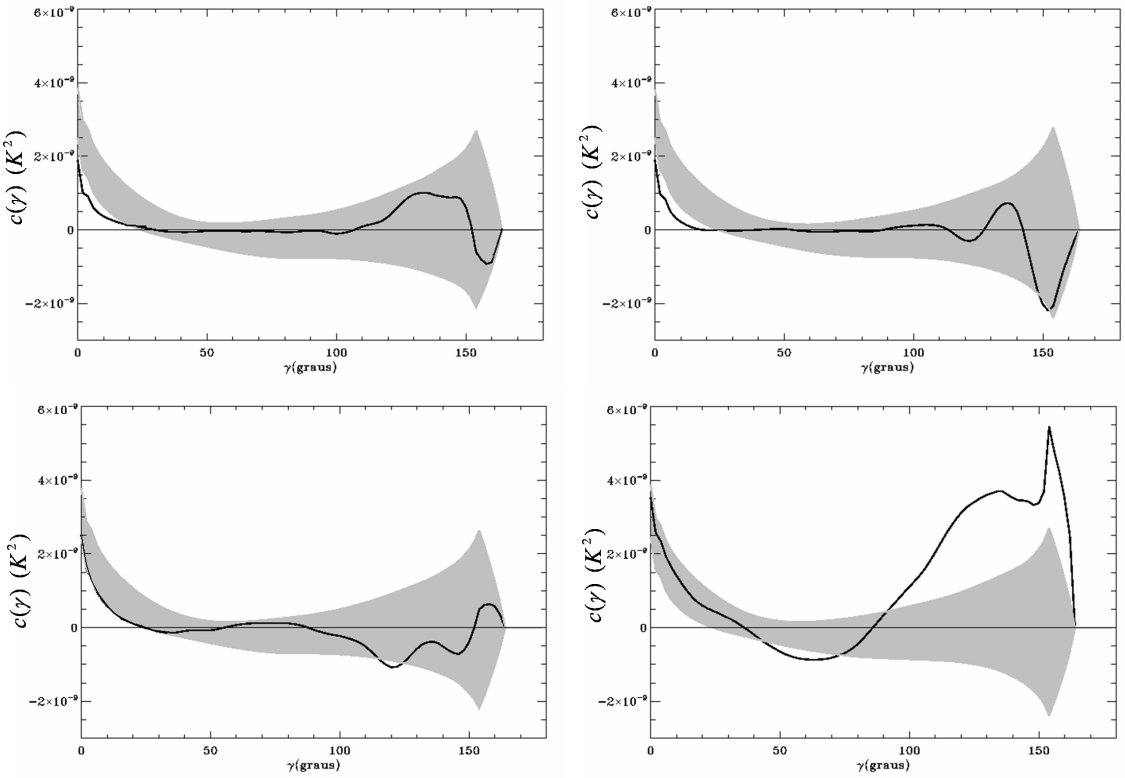

Figura 5.12 - As figuras da esquerda, de cima para baixo, mostram as curvas obtidas com a função de correlação de dois pontos do mapa ILC5 para o QSE e QSD, respectivamente. Da mesma forma, para as figuras da direita, de cima para baixo, as curvas foram obtidas para o QIE e QID, respectivamente. A parte sombreada é o desvio padrão dos quadrantes para as 1000 simulações do grupo 1.

6 CONCLUSÃO

Nesse trabalho, analisamos mapas de multifreqüências do WMAP3 e WMAP5 utilizando principalmente um corte Galáctico de $|b| < 10^{\circ}$ mais a máscara KQ85. O objetivo principal da análise era investigar a presença de assimetrias anômalas por hemisférios e por quadrantes nos dados.

Foi confirmada a presença de uma assimetria, ou seja, uma diferença significativa de potência, entre os hemisférios norte e sul nos mapas de multifreqüências analisados. Para calcular a probabilidade de ocorrência dessa assimetria no MCP, construimos 1000 simulações Monte Carlo. Mostramos que a probabilidade da assimetria Norte-Sul ocorrer varia entre 4% e 7%. A média simples calculada entre as probabilidades encontradas nos 5 mapas analisados foi computada em 6,6% que, de acordo com a definição do Capítulo 3, não é considerada anômala. Para um estudo mais detalhado, testamos como os valores do quadrupolo e do octopolo poderiam estar influenciando o resultado. Mais 2000 simulações Monte Carlo foram feitas, divididas em 2 grupos de 1000, cada um com diferentes valores de quadrupolo e octopolo. Em um dos grupos (grupo 2) alteramos o modelo ΛCDM de forma que $C_2 = C_3 = C_4 = 323,9751 \mu K^2$. No outro grupo (grupo 3), os valores de C_2 e C_3 são os mesmos que os observados nos dados do WMAP5. Em ambos os casos, a média das probabilidades de ocorrência da assimetria norte-sul para os 5 mapas é 3,6%, o que torna a assimetria norte-sul uma anomalia nos dados. Esse resultado mostra que alterando o modelo ΛCDM de forma a diminuir o valor do quadrupolo e do octopolo, tornamos a assimetria norte-sul anômala ao contrário de justificar sua baixa probabilidade de ocorrência.

A análise por quadrantes revelou assimetrias entre o QID e os demais quadrantes. A maior assimetria foi encontrada entre o QID e o QSD. Levando-se em consideração as 1000 simulações do MCP, a probabilidade dessa assimetria ser encontrada varia entre 1,1% e 15,5%, que na média, 6,6%, não caracteriza uma anomalia. Porém, 3 dos 5 mapas apresentam baixa probabilidade de ocorrência da assimetria QID-QSD entre 1,1% e 2,4%, sendo a assimetria considerada para esses 3 mapas anômala. Uma análise mais detalhada precisa ser feita para entender a discrepância entre os resultados para 2 dos mapas analisados, pois eles estão bem correlacionados com todos os outros em todos os quadrantes. A mesma análise foi feita para as assimetrias entre o QID-QIE e entre o QID-QSE, e elas não foram consideradas anômalas, já que apresentam probabilidade média de ocorrência de 5,8% e 7,2%, respectivamente. Considerando o espectro das outras 2000 simulações com valores do quadrupolo e octopolo modificados no calculo das probabilidades não obtivemos mudanças significativas nos resultados.

Para o mapa ILC5 as 3 assimetrias ocorrem simultaneamente. A probabilidade de ocorrência das 3 assimetrias simultaneamente nas simulações do modelo ΛCDM é de 0,3%. Para as 2000 realizações do grupo 2 e 3 essa probabilidade foi calculada em 0,6% e 1,6% respectivamente.

Por fim, algumas hipóteses foram testadas para tentar explicar as 3 assimetrias simultaneamente que, para os 3 grupos de simulações, são consideradas anômalas. A influência do *Cold Spot* presente no QID e do alinhamento entre o quadrupolo e octopolo nos resultado para quadrantes foram testadas para todos os grupos de simulações. Nenhuma relação entre as anomalias testadas e a anomalia por quadrantes foi encontrada. A última hipótese testada somente para o espectro do MCP sem alterações foi a relação entre a utilização da máscara assimétrica na análise e a anomalia encontrada nos quadrantes. Nesse caso, ao contrário do que se esperava, a utilização da máscara suavizou as assimetrias. Quando a máscara KQ85 não é utilizada a probabilidade das 3 assimetrias ocorrerem simultaneamente é menor que 0,1%.

Nesse trabalho, a assimetria-norte sul encontrada nos dados do WMAP5 concorda com o WMAP3. As assimetrias encontradas por quadrantes para o WMAP5 também concordam com o WMAP3. Nenhuma das hipóteses testadas aqui conseguiu explicar a anomalia dos quadrantes e, portanto, precisam ser melhor estudadas. Umas das perspectivas desse trabalho é investigar as anomalias a distribuição angular da RCFM por outros métodos, como por exemplo, a função de correlação de três pontos e o PASH (*Pair Angular Separation Histogram*) (BERNUI; VILLELA, 2006) e testar novas hipóteses para tentar explicar as anomalias, como por exemplo, a utilização de outros cortes galácticos com a finalidade de tentar descartar a influência de *foregrounds*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMO, L. R.; BERNUI, A.; FERREIRA, I. S.; VILLELA, T.; WUENSCHE, C. A. Alignment tests for low CMB multipoles. **Physical Review D**, v. 74, Sep. 2006. 40

ABRAMO, L. R.; SODRÉ, L. Can the Local Supercluster explain the low CMB multipoles? Dec. 2003. Disponível em: <arXiv:astro-ph/0312124>. Acesso em: 01 Dec. 2008. 40

ABRAMO, L. R.; SODRÉ, L.; WUENSCHE, C. A. Anomalies in the low cmb multipoles and extended foregrounds. **Physical Review D**, v. 74, Oct 2006. 40

ALPHER, R. A.; BETHE, H.; GAMOW, G. The Origin of Chemical Elements. **Physical Review**, v. 73, Apr. 1948. 19

ALPHER, R. A.; HERMAN, R. C. Evolution of the universe. **Nature**, v. 162, Nov. 1948. 19

BENNETT; HALPERN, M.; HINSHAW, G.; JAROSIK, N.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; PAGE, L.; SPERGEL, D. N.; TUCKER, G. S.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L.; BARNES, C.; GREASON, M. R.; HILL, R. S.; KOMATSU, E.; NOLTA, M. R.; ODEGARD, N.; PEIRS, H. V.; VERDE, L.; WEILAND, J. L. First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Preliminary maps and basic results. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 148, Sep. 2003. 15, 37, 38

BENNETT, C. L.; BAY, M.; HALPERN, M.; HINSHAW, G.; JACKSON, C.; JAROSIK, N.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; PAGE, L.; SPERGEL, D. N.; TUCKER, G. S.; WILKINSON, D. T.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L. The Microwave Anisotropy Probe (MAP) Mission. **The Astrophysical Journal**, v. 583, Jan. 2003. 31, 33

BENNETT, C. L.; HILL, R. S.; HINSHAW, G.; NOLTA, M. R.; ODEGARD, N.; PAGE, L.; SPERGEL, D. N.; WEILAND, J. L.; WRIGHT, E. L.; HALPERN, M.; JAROSIK, N.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; TUCKER, G. S.; WOLLACK, E. First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Foreground emission. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 148, Sep. 2003. 34, 43

BENOIT, A.; ADE, P.; AMBLARD, A.; ANSARI, R.; AUBOURG, E.; BARTLETT, J.; BERNARD, J. P.; BHATIA, R. S.; BLANCHARD, A.; BOCK, J. J.; BOSCALERI, A.; BOUCHET, F. R.; BOURRACHOT, A.; CAMUS, P.; COUCHOT, F.; BERNARDIS, P.

de; DELABROUILLE, J.; DÉSERT, F. X.; DORÉ, O.; DOUSPIS, M.; DUMOULIN, L.; DUPAC, X.; FILLIATRE, P.; GANGA, K.; GANNAWAY, F.; GAUTIER, B.; GIARD, M.; GIRAUD-HÉRAUD, Y.; GISPERT, R.; GUGLIELM, L.; HAMILTON, J. C.; HANANY, S.; HENROT-VERSILLÉ, S.; HRISTOV, V. V.; KAPLAN, J.; LAGACHE, G.; LAMARRE, J. M.; LANGE, A. E.; MADET, K.; MAFFEI, B.; MARRONE, D.; MASI, S.; MURPHY, J. A.; NARAGHI, F.; NATI, F.; PERRIN, G.; PIAT, M.; PUGET, J. L.; SANTOS, D.; SUDIWALA, R. V.; VANEL, J. C.; VIBERT, D.; WAKUI, E.; YVON, D. Archeops: a high resolution, large sky coverage balloon experiment for mapping cosmic microwave background anisotropies. **Astroparticle Physics**, v. 17, May 2002. 23

BENOIT, A.; ADE, P.; AMBLARD, A.; ANSARI, R.; AUBOURG, E.; BARGOT, S.; BARTLETT, J. G.; BERNARD, J.-P.; BATHIA, R. S.; BLANCHARDB, A.; BOCK, J. J.; BOSCALERI, A.; BOUCHET, F. R.; BOURRACHOT, A.; CAMUS, P.; COUCHOT, F.; BERNARDIS, P. D.; DELABROUILLE, J.; DESERT, F.-X.; DORÉ, O.; DOUSPIS, M.; DUMOULIN, L.; DUPAC, X.; FILLIATRE, P.; FOSALBA, P.; GANGA, K.; GANNAWAY, F.; GAUTIER, B.; GIARD, M.; GIRAUD-HERAUD, Y.; GISPERT, R.; GUGLIELMI, L.; HAMILTON, J.-C.; HANANY, S.; HENROT-VERSILLE, S.; KAPLAN, J.; LAGACHE, G.; LAMARRE, J.-M.; LANGE, A. E.; MACIAS-PEREZ, J. F.; MADET, K.; MAFFEI, B.; MAGNEVILLE, C.; MARRONE, D.; MASI, S.; MAYET, F.; MURPHY, A.; NARAGHI, F.; NATI, F.; PATANCHON, G.; PERRIN, G.; PIAT, M.; PONTHIEU, N.; PRUNET, S.; PUGET, J.-L.; RENAULT, C.; ROSSET, C.; SANTOS, D.; STAROBINSKY, A.; STRUKOV, I.; SUDIWALA, R. V.; TEYSSIER, R.; TRISTRAM, M.; TUCKER, C.; VANEL, J.-C.; VIBERT, D.; WAKUI, E.; YVON, D. Cosmological constraints from Archeops. **Astronomy and Astrophysics**, v. 399, Mar 2003. 26

BERNARDIS, P. de; ADE, P.; BOCK, J.; BOND, J.; BORRILL, J.; BOSCALERI, A.; COBLE, K.; CRILL, B.; GASPERIS, G. D.; TROIA, G. D.; FARESE, P.; FERREIRA, P.; GANGA, K.; GIACOMETTI, M.; HIVON, E.; HRISTOV, V.; IACOANGELI, A.; JAFFE, A.; LANGE, A.; MARTINIS, L.; MASI, S.; MASON, P.; MAUSKOPF, P.; MELCHIORRI, A.; MIGLIO, L.; MONTROY, T.; NETTERFIELD, C.; PASCALE, E.; PIACENTINI, F.; POGOSYAN, D.; PONGETTI, F.; PRUNET, S.; RAO, S.; ROMEO, G.; RUHL, J.; SCARAMUZZI, F.; SFORNA, D.; VITTORIO, N. First results from the BOOMERanG experiment. In: DURRER, R.; GARCIA-BELLIDO, J.; SHAPOSHNIKOV, M. (Ed.). **Cosmology and Particle Physics**. [S.l.: s.n.], 2001. (American Institute of Physics Conference Series, v. 555), p. 85–+. 23

BERNUI, A.; HIPÓLITO-RICALDI, W. S. Can a primordial magnetic field originate

large-scale anomalies in WMAP data? July. 2008. Disponível em: <arXiv:astro-ph/08071076>. Acesso em: 20 Jan. 2009. 42

BERNUI, A.; VILLELA, T. A method to search for topological signatures in the angular distribution of cosmic objects. **Astronomy and Astropysics**, v. 445, Jan. 2006. 68

BERNUI, A.; VILLELA, T.; WUENSCHE, C. A.; LEONARDI, R.; FERREIRA, I. On the CMB large-scale angular correlation. **Astronomy and Astrophysics**, v. 454, Jan. 2006. 42, 49

BERSANELLI, M.; MAINO, D.; MENNELLA, A. Anisotropies of the Cosmic Microwave Background. **Nuovo Cimento Rivista Serie**, v. 25, Sep. 2002. 23

BRIDLE, S. L.; LEWIS, A. M.; WELLER, J.; EFSTATHIOU, G. Reconstructing the primordial power spectrum. **New Astronomy Review**, v. 47, Nov. 2003. 38

CONKLIN, E. K. Velocity of the Earth with Respect to the Cosmic Background Radiation. **Nature**, v. 222, June 1969. 21

COREY, B. E.; WILKINSON, D. T. A Measurement of the Cosmic Microwave Background Anisotropy at 19 GHz. **Bulletin of the American Astronomical Society**, v. 8, Mar. 1976. 21

CRUZ, M.; CAYÓN, L.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, E.; VIELVA, P.; JIN, J. The non-gaussian cold spot in the 3-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe data. **The Astrophysical Journal**, v. 655, Jan. 2007. 41

CRUZ, M.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, E.; VIELVA, P.; CAYÓN, L. Detection of a non-gaussian spot in WMAP. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 356, Jan. 2005. 40

CRUZ, M.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, E.; VIELVA, P.; DIEGO, J. M.; HOBSON, M.; TUROK, N. The CMB cold spot: texture, cluster or void? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 390, Nov. 2008. 41

CRUZ, M.; TUCCI, M.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, E.; VIELVA, P. The non-gaussian cold spot in Wilkinson Microwave Anisotropy Probe: significance, morphology and foreground contribution. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 369, Mar. 2006. 40

DICKE, R. H.; PEEBLES, P. J. E.; ROLL, P. G.; WILKINSON, D. T. Cosmic Black-Body Radiation. **The Astronomical Journal**, v. 142, Jul. 1965. 21

EFSTATHIOU, G. Is the low CMB quadrupole a signature of spatial curvature? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 343, Aug. 2003. 38

_____. The statistical significance of the low Cosmic Microwave Background multipoles. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 346, Dec. 2003. 37

ERIKSEN, H. K.; BANDAY, A. J.; GóRSKI, K. M.; LILJE, P. B. On foreground removal from the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe data by an internal linear combination method: limitations and implications. **The Astrophysical Journal**, v. 612, Sep. 2004. 40

_____. The N-point correlation function of the first year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe sky maps. **The Astrophysical Journal**, v. 622, Mar. 2005. 42

ERIKSEN, H. K.; HANSEN, F. K.; BANDAY, A. J.; GóRSKY, K. M.; LILJE, P. B. Asymmetries in the Cosmic Microwave Background anisotropy field. **The Astrophysical Journal**, v. 605, April 2004. 29, 41, 42

FIXSEN, D. J.; CHENG, E. S.; WILKINSON, D. T. Large-scale anisotropy in the 2.7-k radiation with a balloon-born maser radiometer at 24.5 ghz. **Physical Review Letters**, v. 50, Feb 1983. 21

FIXSEN, D. J.; MATHER, J. C. The spectral results of the Far-Infrared Absolute Spectrophotometer instrument on COBE. **The Astrophysical Journal**, v. 581, Dec. 2002. 21

FRIEDMAN, A. Über die Krümmung des Raumes. **Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei**, v. 10, Dec. 1922. 19

GAMOW, G. The evolution of the universe. **Nature**, v. 162, Apr. 1948. 19

_____. The Origin of Elements and the Separation of Galaxies. **Physical Review**, v. 74, Aug. 1948. 19

GAZTAñAGA, E.; WAGG, J.; MULTAMÄKI, T.; MONTANA, A.; HUGHES, D. H. Two point anisotropies in WMAP and the cosmic quadrupole. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 346, Apr. 2003. 37, 38

GOLD, B.; BENNETT, C. L.; HILL, R. S.; HINSHAW, G.; ODEGARD, N.; PAGE, L.; SPERGEL, D. N.; WEILAND, J. L.; DUNKLEY, J.; HALPERN, M.; JAROSIK, N.; KOGUT, A.; KOMATSU, E.; LARSON, D.; MEYER, S. S.; NOLTA, M. R.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L. Five year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Galactic foreground emission. Mar. 2008. Disponível em: <arXiv:astro-ph/08030715>. Acesso em: 22 Apr. 2008. 34, 35, 43

GóRSKI, K. M.; HIVON, E.; BANDAY, A. J.; WANDELT, B. D.; HANSEN, F. K.; REINECKE, M.; BARTELMANN, M. HEALPix: A framework for high-resolution discretization and fast analysis of data distributed on the sphere. **The Astrophysical Journal**, v. 622, Apr. 2005. 47

GóRSKI, K. M.; WANDELT, B. D.; HANSEN, F. K.; HIVON, E.; BANDAY, A. J. The HEALPix Primer. May 1999. Disponível em: <arXiv:astro-ph/9905275>. Acesso em: 05 May 2008. 47

GURZADYAN, V. G.; STAROBINSKY, A. A.; KASHIN, A. L.; KHACHATRYAN, H.; YEGORIAN, G. On axial and plane-mirror inhomogeneities in the WMAP3 Cosmic Microwave Background maps. Nov. 2007. Disponível em: <arXiv:astro-ph/07090886>. Acesso em: 01 Dec. 2008. 40

HANANY, S.; ADE, P.; BALBI, A.; BOCK, J.; BORRILL, J.; BOSCALERI, A.; BERNARDIS, P. de; FERREIRA, P. G.; HRISTOV, V. V.; JAFFE, A. H.; LANGE, A. E.; LEE, A. T.; MAUSKOPF, P. D.; NETTERFIELD, C. B.; OH, S.; PASCALE, E.; RABII, B.; RICHARDS, P. L.; SMOOT, G. F.; STOMPOR, R.; WINANT, C. D.; WU, J. H. P. MAXIMA-1: A measurement of the Cosmic Microwave Background anisotropy on angular scales of 10'-5°. **The Astrophysical Journal Letters**, v. 545, Nov. 2000. 23

HANSEN, F. K.; CABELLA, P.; MARINUCCI, D.; VITTORIO, N. Asymmetries in the local curvature of the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. **The Astrophysical Journal**, v. 607, June 2004. 29, 42

HENRY, P. S. Isotropy of the 3 k Background. **Nature**, v. 231, June 1971. 21

HINSHAW, G.; NOLTA, M. R.; BENNETT, C. L.; BEAN, R.; DORÉ, O.; GREASON, M. R.; HALPERN, M.; HILL, R. S.; JAROSIK, N.; KOGUT, A.; KOMATSU, E.; LIMON, M.; ODEGARD, N.; MEYER, S. S.; PAGE, L.; PEIRIS, H.; SPERGEL, D. N.; TUCKE, G. S.; VERDE, L.; WEILAND, J. L.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L. Three-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: temperature analysis. **The Astrophysical Journal**, v. 170, June 2007. 34

HU, W.; DODELSON, S. Cosmic Microwave Background anisotropies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 40, Sep. 2002. 28

HUBBLE, E. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 15, March 1929. 19

JAROSIK, N.; BENNETT, C. L.; HALPERN, M.; HINSHAW, G.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; PAGE, L.; POSPIESZALSKI, M.; SPERGEL, D. N.;

TUCKER, G. S.; WILKINSON, D. T.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L.; ZHANG, Z. Design, implementation, and testing of the Microwave Anisotropy Probe radiometers. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 145, Apr. 2003. 31

KIM, J. K.; NASELSKY, P.; CHRISTENSEN, P. R. CMB map derived from the WMAP data through Harmonic Internal Linear Combination. **Physical Review D**, v. 77, May 2008. 43

KOGUT, A.; LINEWEAVER, C.; SMOOT, G. F.; BENNETT, C. L.; BANDAY, A.; BOGGESS, N. W.; CHENG, E. S.; AMICI, G. de; FIXSEN, D. J.; HINSHAW, G.; JACKSON, P. D.; JANSSEN, M.; KEEGSTRA, P.; LOEWENSTEIN, K.; LUBIN, P.; MATHER, J. C.; TENORIO, L.; WEISS, R.; WILKINSON, D. T.; WRIGHT, E. Dipole anisotropy in the COBE differential microwave radiometers first-year sky maps. **The Astrophysical Journal**, v. 419, Dec. 1993. 21

KOLB, E. W.; TURNER, M. S. **The early universe**. [S.l.]: Westview Press, 1994. 23

LEITCH, E. M.; PRYKE, C.; HALVERSON, N. W.; KOVAC, J.; DAVISON, G.; LAROQUE, S.; SCHARTMAN, E.; YAMASAKI, J.; CARLSTROM, J. E.; HOLZAPFEL, W. L.; DRAGOVAN, M.; CARTWRIGHT, J. K.; MASON, B. S.; PADIN, S.; PEARSON, T. J.; READHEAD, A. C. S.; SHEPHERD, M. C. Experiment design and first season observations with the Degree Angular Scale Interferometer. **The Astrophysical Jornal**, v. 568, Mar. 2000. 22

LEMAîTRE, G. The beginning of the world from the point of view od quantum theory. **Nature**, v. 127, May 1931. 19

LUBIN, P.; VILLELA, T.; EPSTEIN, G.; SMOOT, G. A map of the Cosmic Background Radiation at 3 millimeters. **The Astrophysical Jornal**, v. 298, Nov. 1985. 21

LUMINET, J. P.; WEEKS, J.; RIAZUELO, A.; LEHOUCQ, R.; UZAN, J. P. Dodecahedral space topology as an explanation for weak wide-angle temperature correlations in the Cosmic Microwave Background. **Nature**, v. 425, Oct. 2003. 38

MATHER, J. C.; CHENG, E. S.; JR, R. E. E.; ISAACMAN, R. B.; MEYER, S.; SHAFER, R. A.; WEISS, R.; WRIGHT, E. L.; BENNETT, C.; BOGGESS, N. W.; DWEK, E.; GULKIS, S.; HAUSER, M. G.; JANSSEN, M.; KELSALL, T.; LUBIN, P. M.; JR, S. H. M.; MURDOCK, T. L.; SILVERBERG, R. F.; SMOOT, G. F.; WILKINSON, D. T. A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COsmic Background Explorer (COBE) satellite. **The Astrophysical Journal**, v. 354, May 1990. 21, 22

MOROI, T.; TAKAHASHI, T. Correlated isocurvature fluctuation in quintessence and suppressed CMB anisotropies at low multipoles. **Physical Review Letters**, v. 92, Mar. 2004. 38

NOLTA, M. R.; DUNKLEY, J.; HILL, R. S.; HINSHAW, G.; KOMATSU, E.; LARSON, D.; PAGE, L.; SPERGEL, D. N.; BENNETT, C. L.; GOLD, B.; JAROSIK, N.; ODEGARD, N.; WEILAND, J. L.; WOLLACK, E.; HALPERN, M.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; TUCKER, G. S.; WRIGHT, E. L. Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Angular Power Spectra. Mar. 2008. Disponível em: <arXiv:astro-ph/08030593>. Acesso em: 27 Nov. 2008. 33

OLIVEIRA-COSTA, A. D.; TEGMARK, M. CMB multipole measurements in the presence of foregrounds. **Physical Review D**, v. 74, July 2006. 43

OLIVEIRA-COSTA, A. D.; TEGMARK, M.; ZALDARRIAGA, M.; HAMILTON, A. Significance of the largest scale CMB fluctuation in WMAP. **Physical Review D**, v. 69, Mar. 2004. 29, 39, 40

PADIN, S.; SHEPHERD, M. C.; CARTWRIGHT, J. K.; KEENEY, R. G.; MASON, B. S.; PEARSON, T. J.; READHEAD, A. C. S.; SCHAAL, W. A.; SIEVERS, J.; UDOMPRASERT, P. S.; YAMASAKI, J. K.; HOLZAPFEL, W. L.; CARLSTROM, J. E.; JOY, M.; MYERS, S. T.; OTAROLA, A. Cosmic Background Imager. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 114, Jan. 2002. 22

PAGE, L.; JACKSON, C.; BARNES c.; BENNETT, C. L.; HALPERN, M.; HINSHAW, G.; JAROSKI, N.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; SPERGEL, D. N.; TUCKER, G. S.; WILKINSON, D. T.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L. The optical design and characterization of the Microwave Anisotropy Probe. **The Astrophysical Journal**, v. 585, Mar. 2003. 31

PARK, C.-G.; PARK, C.; GOTT, J. R. Cleaned three-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Cosmic Microwave Background map: Magnitude of the quadrupole and alignment of large scale modes. **The Astrophysical Journal**, v. 660, May. 2007. 43

PENZIAS, A.; WILSON, R. A measurement of excess antenna temperature at 408 MC/s. **The Astrophysical Journal**, v. 142, May 1965. 20

PERLMUTTER, S.; ALDERING, G.; GOLDHABER, G.; KNOP, R. A.; NUGENT, P.; CASTRO, P. G.; DEUSTUA, S.; FABBRO, S.; GOOBAR, A.; GROOM, D. E.; HOOK, I. M.; KIM, A. G.; KIM, M. Y.; LEE, J. C.; NUNES, N. J.; PAIN, R.; PENNYPACKER, C. R.; QUIMBY, R.; LIDMAN, C.; ELLIS, R. S.; IRWIN, M.; MCMAHO, R. G.; RUIZ-LAPUENTE, P.; WALTON, N.; SCHAEFER, B.; BOYLE,

B. J.; FILIPPENKO, A. V.; MATHESON, T.; FRUCHTER, A.; PANAGIA, N.; NEWBERG, H. J. M.; COUCH, W. J.; PROJECT, T. S. C. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. **The Astrophysical Journal**. 20

PHILLIPS, N. G.; KOGUT, A. Constraints on the topology of the universe from the WMAP first year sky maps. Apr. 2004. Disponível em: <arXiv:astro-ph/0404400>. Acesso em: 27 Nov. 2008. 38

RIESS, A. G.; FILIPPENKO, A. V.; CHALLIS, P.; CLOCCHIATTI, A.; DIERCKS, A.; GARNAVICH, P. M.; GILLILAND, R. L.; HOGAN, C. J.; JHA, S.; KIRSHNER, R. P.; LEIBUNDGUT, B.; PHILLIPS, M. M.; REISS, D.; SCHMIDT, B. P.; SCHOMMER, R. A.; SMITH, R. G.; SPYROMILIO, J.; STUBBS, C.; SUNTZEFF, N. B.; TONRY, J. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. **The Astronomical Jornal**, v. 116, Sep. 1998. 20

RUDNICK, L.; BROWN, S.; WILLIAMS, L. R. Extragalactic radio sources and the WMAP Cold Spot. **The Astrophysical Journal**, v. 671, Dec. 2007. 40

RUNYAN, M.; ADE, P. A. R.; BHATIA, R. S.; BOCK, J. J.; DAUB, M. D.; GOLDSTEIN, J. H.; HAYNES, C. V.; HOLZAPFEL, W. L.; KUO, C. L.; LANGE, A. E.; LEONG, J.; LUEKER, M.; NEWCOMB, M.; PETERSON, J. B.; REICHARDT, C.; RUHL, J.; SIRBI, G.; TORBET, E.; TUCKER, C.; TURNER, A. D.; WOOLSEY, D. ACBAR: The Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 149, Dec. 2003. 22

SACHS, R. K.; WOLFE, A. M. Perturbations of a Cosmological Model and Angular Variations of the Microwave Background. **The Astrophysical Journal**, v. 147, Jan. 1967. 24

SMOOT, G. F.; BENNETT, C. L.; KOGUT, A.; WRIGHT, E. L.; AYMON, J.; BOGGESS, N. W.; CHENG, E. S.; AMICI, G. D.; GULKIS, S.; HAUSER, M. G.; HINSHAW, G.; JACKSON, P. D.; JANSEN, M.; KAITA, E.; KELSALL, T.; KEEGSTRA, P.; LINEWEAVER, C.; LOEWENSTEIN, K.; LUBIN, P. M.; MATHER, J. C.; MEYER, S. S.; JR, S. H. M.; MURDOCK, T. L.; ROKKE, L.; SILVERBERG, R. F.; TENORIO, L.; WEISS, R.; WILKINSON, D. T. Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps. **The Astrophysical Journal**, v. 396, Sept. 1992. 21, 28

SMOOT, G. F.; GORENSTEIN, M. V.; MULLER, R. A. Detection of Anisotropy in the Cosmic Microwave Radiation. **Physical Review Letters**, v. 39, Oct. 1977. 21

SPERGEL, D. N.; VERDE, L.; PEIRIS, E. K. H. V.; NOLTA, M.; BENNETT, C. L.; HALPERN, M.; HINSHAW, G.; JAROSIK, N.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; PAGE, L.; TUCKER, G. S.; WEILAND, J. L.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L. First year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: determination of cosmological parameters. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 148, Sep. 2003. 38

TEGMARK, M.; OLIVEIRA-COSTA, A. D.; HAMILTON, A. A high resolution foreground cleaned CMB map from WMAP. **Physical Review D**, v. 68, Dec. 2003. 28, 29, 38, 39

VIELVA, P.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, E.; BARREIRO, R. B.; SANZ, J. L.; CAYÓN, L. Detection of noun-gaussianity in the Wilkinson Microwave Anisotropy Probe first-year data using spherical wavelets. **The Astrophysical Journal**, v. 609, July 2004. 29, 40

WATSON, R. A.; CARREIRA, P.; CLEARY, K.; DAVIES, R. D.; DAVIS, R. J.; DICKINSON, C.; GRAINGE, K.; GUTIÉRREZ, C. M.; HOBSON, M. P.; JONES, M. E.; KNEISSL, R.; LASENBY, A.; MAISINGER, K.; POOLEY, G. G.; REBOLO, R.; RUBIÑO-MARTIN, J. A.; RUSHOLME, B.; SAUNDERS, R. D. E.; SAVAGE, R.; SCOTT, P. F.; SLOSAR, A.; MOLINA, P. J. S.; TAYLOR, A. C.; TITTERINGTON, D.; WALDRAM, E.; WILKINSON, A. First results from the Very Small Array - I. Observational methods. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 341, Jun. 2003. 22

ZWICKY, F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. **Helvetica Physica Acta**, v. 6, 1933. 20

A APÊNDICE A - Efeito Sachs-Wolfe

Nesse apêndice usaremos unidades naturais, $c = k_b = h/2\pi = 1$, sendo c a velocidade da luz, k_b a constante de Boltzmann e h a constante de Planck.

Para grandes escalas angulares, as anisotropias da RCFM estão relacionadas com irregularidades na distribuição de matéria na SUE. Como mencionado anteriormente, os fótons da RCFM devem sair do potencial gravitacional, causado por essas irregularidades, no qual estão imersos. Começaremos esse apêndice definindo a métrica de FRW para um universo plano, dada por

$$\begin{aligned} g_{00} &= -1 \\ g_{0i} &= 0 \\ g_{ii} &= a^2\delta_{ij}, \end{aligned} \tag{A.1}$$

sendo δ_{ij} o delta de Kronecker. Definimos de forma genérica o intervalo que corresponde à medida de distância no espaço quadridimensional, como sendo

$$ds^2 = \sum_{\mu,\nu=0}^{3} g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu. \tag{A.2}$$

Para o caso FRW, teremos:

$$ds'^2 = -dt'^2 + a^2dx'^2 + a^2dy'^2 + a^2dz'^2. \tag{A.3}$$

Para calcular a contribuição do efeito Sachs-Wolfe para as anisotropias da distribuição angular da RCFM, devemos levar em consideração perturbações escalares na métrica, que podem ser escritas da forma:

$$\begin{aligned} g_{00} &= -1 - 2\Psi, \\ g_{0i} &= 0, \\ g_{ii} &= a^2\delta_{ij}(1 + 2\Phi). \end{aligned} \tag{A.4}$$

Para a métrica perturbada o intervalo pode ser escrito como sendo

$$ds^2 = -(1+2\Psi)dt^2 + a^2(1+2\Phi)dx^2 + a^2(1+2\Phi)dy^2 + (1+2\Phi)a^2dz^2. \tag{A.5}$$

As perturbações na métrica são descritas por Ψ, que corresponde ao potencial newtoniano e Φ corresponde a perturbações na curvatura espacial. Na ausência das perturbações Ψ e Φ a métrica se reduz à métrica de FRW.

As perturbações escalares na métrica geram uma perturbação na cooredenada temporal da forma,

$$t' = t + \delta t. \tag{A.6}$$

Como o intervalo é um invariante, $ds'^2 = ds^2$, comparamos as Equações A.3 e A.5:

$$\begin{aligned} dt'^2 &= (1+2\Psi)dt^2, \\ t' &= (1+2\Psi)^{1/2}t, \\ t' &\approx (1+\Psi)t, \\ t' &\approx t + \Psi t. \end{aligned} \tag{A.7}$$

Comparando, agora, as Equações A.6 e A.7, concluimos que

$$\frac{\delta t}{t} = \Psi. \tag{A.8}$$

O parâmetro de Hubble é definido como sendo,

$$H(t) = \frac{da/dt}{a}, \tag{A.9}$$

e temos

$$t = \int \frac{da}{aH(t)}. \tag{A.10}$$

A equação de Friedman é dada por

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3}\left[\rho(t) + \frac{\rho_{crit} - \rho_0}{a^2(t)}\right], \tag{A.11}$$

em que $\rho(t)$ é a densidade de energia do universo em função do tempo, ρ_{crit} é a densidade crítica do universo e ρ_0 sua densidade atual. G é a constante gravitacioanl universal. Sabemos, no entanto, que $\rho_0 = \rho_{crit}$. Nesse caso,

$$H^2(t) = \frac{8\pi G}{3}\rho(t). \tag{A.12}$$

Substituindo esse valor na Equação A.4, teremos

$$t = \int \frac{da}{a\left(\frac{8\pi G}{3}\rho(t)\right)^{1/2}} \propto \int \frac{da}{a\rho^{1/2}}. \tag{A.13}$$

No caso que está sendo estudado, o universo está na era dominada por matéria, então $\rho \propto a^{-3}$. Substituindo esse valor na Equação A.7:

$$t \propto a^{3/2}. \tag{A.14}$$

Portanto,

$$\begin{aligned} \delta t &\propto \frac{3}{2}a^{1/2}\delta a, \\ \frac{\delta t}{t} &= \frac{3}{2}a^{1/2}\frac{\delta a}{a^{3/2}}, \\ \frac{\delta t}{t} &= \frac{3}{2}\frac{\delta a}{a}. \end{aligned} \tag{A.15}$$

Das Equações A.8 e A.15,

$$\frac{2}{3}\Psi = \frac{\delta a}{a}. \tag{A.16}$$

Lembramos, agora, que a temperatura dos fótons varia no tempo proporcionalmente ao fator de escala a

$$\frac{T(t)}{T_0} = \frac{1}{a(t)}$$
$$\frac{\delta T}{T_0} = -a^{-2}\delta a$$
$$T_0 = T(t)a(t)$$
$$\frac{\delta T}{T} = -\frac{\delta a}{a}, \tag{A.17}$$

sendo que T_0 é a temperatura da RCFM hoje.

Substituindo A.16 em A.17, encontramos a temperatura dos fótons antes deles sairem do poço de potencial no qual estão imersos:

$$\frac{\delta T}{T}_{(inicial)} = -\frac{2}{3}\Psi. \tag{A.18}$$

Para computar a temperatura dos fótons após a saída deles desse poço de potencial Ψ, fazemos

$$\frac{\delta T}{T}_{(final)} = -\frac{2}{3}\Psi + \Psi$$
$$\frac{\delta T}{T}_{(final)} = -\frac{1}{3}\Psi. \tag{A.19}$$

Essa equação mostra a variação de temperatura com relação à temperatura média causada pelo efeito Sachs-Wolfe, como queríamos demonstrar.

B APÊNDICE B - Harmônicos esféricos

Esse apêndice tem a finalidade de proporcionar uma breve explicação sobre os harmônicos esféricos e os parâmetros l e m que são obtidos calculando as soluções para a equação de Laplace escrita em coordenadas esféricas, que é dada por:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial^2}{\partial r^2}(r\Phi) + \frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta\frac{\partial\Phi}{\partial\theta}) + \frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2\Phi}{\partial\phi^2} = 0, \tag{B.1}$$

sendo θ e ϕ os ângulos polar e azimutal, respectivamente. Supondo que esse potencial Φ genérico seja dado por um produto de funções, ele pode ser reescrito da forma:

$$\Phi = \frac{U(r)}{r}P(\theta)Q(\phi). \tag{B.2}$$

Substituindo a Equação B.2 em B.1, teremos:

$$r^2\sin^2\theta\left[\frac{1}{U(r)}\frac{d^2U(r)}{dr^2} + \frac{1}{r^2\sin P(\theta)}\frac{d}{d\theta}(\sin\theta\frac{dP(\theta)}{d\theta})\right] = -\frac{1}{Q}\frac{d^2Q(\phi)}{d\phi^2}. \tag{B.3}$$

O lado esquerdo da equação tem dependência em r e θ, enquanto o lado direito tem dependência somente em ϕ. Nesse caso, devemos igualar a Equação B.3 a uma constante, que chamamos de m^2. Para o lado direito da igualdade teremos:

$$\frac{1}{Q}\frac{d^2Q(\phi)}{d\phi^2} = -m^2. \tag{B.4}$$

Assim, encontramos a solução da equação de Laplace para a variável ϕ:

$$Q(\phi) = e^{im\phi}, \tag{B.5}$$

para m inteiro.

Igualamos, agora, o lado esquerdo da Equação B.3 a m^2 e após algumas manipulações algébricas encontramos:

$$r^2\frac{1}{U(r)}\frac{d^2U(r)}{dr^2} = \frac{m^2}{\sin^2\theta} - \frac{1}{\sin\theta P(\theta)}\frac{d}{d\theta}\left(\sin\theta\frac{dP(\theta)}{d\theta}\right). \tag{B.6}$$

Da mesma forma que foi feito anteriormente, igualamos essa equação a uma constante que chamamos $l(l+1)$. Resolvemos o lado esquerdo da igualdade B.6 para a variável r, de forma que:

$$\frac{d^2U(r)}{dr^2} - \frac{l(l+1)}{r^2}U(r) = 0, \tag{B.7}$$

sendo, portanto, a solução da equação de Laplace para a variável r:

$$U(r) = Ar^{l+1} + Br^{-l}. \tag{B.8}$$

Para encontrar a solução para θ deve-se resolver a equação de Legendre generalizada, sendo $x = \cos(\theta)$:

$$\frac{d}{dx}[(1-x^2)\frac{d}{dx}P(\theta)] + \left[l(l+1) - \frac{m^2}{1-x^2}\right]P(\theta) = 0. \tag{B.9}$$

Para $m = 0$ obtemos os polinômios de Legendre, que são generalizados pela fórmula de Rodrigues como sendo:

$$P_l(x) = \frac{1}{2^l l!}\frac{d^l}{dx^l}(x^2-1)^l. \tag{B.10}$$

Para $m \neq 0$ teremos:

$$P_l^m(x) = (-1)^m(1-x^2)^{m/2}\frac{d^m}{dx^m}P_l(x). \tag{B.11}$$

É conveniente combinar as soluções angulares da equação de Laplace e construir funções ortonormais na esfera unitária, as quais foram chamadas de harmônicos esféricos:

$$Y_{lm} = \left(\frac{2l+1}{4\pi}\frac{(l-m)!}{(l+m)!}\right)^{1/2} P_l^m(\cos\theta)e^{im\phi}. \tag{B.12}$$

A equação de Laplace, também conhecida como equação do potencial, está associada a processos físicos independentes do tempo ou estacionários.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.