

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física

# Interações no setor escuro e consequências

Jordany Vieira de Melo

Orientador(a): Prof(a). Dr(a). Elcio Abdalla

Monografia apresentada ao Instituto de Física como  
requisito parcial para a qualificação no Curso de  
Doutorado em Ciências.

São Paulo  
2024

University of São Paulo  
Physics Institute

# Dark sector interactions and consequences

Jordany Vieira de Melo

Supervisor: Prof(a). Dr(a). Elcio Abdalla

Report submitted to the Physics Institute of the  
University of São Paulo for the Doctor of Science  
Qualifying Exam.

São Paulo  
2024

# Agradecimentos

Agradeço principalmente ao meu orientador Prof. Elcio Abdalla, que tem dado todo o suporte para que esse trabalho seja desenvolvido. Aos meus colegas de grupo e aos colaboradores externos a USP, dentro do projeto BINGO. Agradeço a minha família e a minha companheira, Luana, que tem me apoiado durante todo esse processo. Agradeço também, em destaque, a CAPES pelo apoio e suporte financeiro que faz esse projeto ser possível.



# Resumo

A cosmologia tem vivido sua era de ouro nas últimas décadas, seja com melhores e mais tecnológicos experimentos sendo produzidos, *softwares* capazes de gerar simulações o mais próximas da realidade ou bancos de dados cada vez maiores e mais precisos. No entanto, estes avanços fazem emergir cada vez mais perguntas a serem respondidas pela comunidade como, por exemplo, a confirmação do cenário inflacionário slow-roll, flutuações no espectro de potências da matéria bariônica, interações entre matéria e energia escuras (DM/DE), entre outros. A não-Gaussianidade surge como um fenômeno que pode ser capaz de confirmar, ou não, estas hipóteses, tendo em vista o fato de sua existência. Como ferramenta para fazer o estudo deste fenômeno, o *bispectrum* se mostrou como os melhores estimadores estatísticos nessa direção. Neste trabalho apresentamos a otimização de um *software*, que teve seu desenvolvimento em um trabalho anterior, capaz de calcular o *bispectrum* em mapas de intensidade e então poder aferir a existência, ou não, de não-gaussianidades em observações cosmológicas. Além do processo de otimização, o atual trabalho de doutorado, tem se proposto a utilizar diferentes tipos de dados para testar a capacidade e analisar a não-gaussianidade existentes neles. Deste modo, pretendemos entender sua aplicabilidade em diferentes fontes de informação, como o radiotelescópio BINGO, e buscar seu entendimento.

**Palavras-chaves:** Cosmologia; Não-Gaussianidade; Bispectro; Mapeamento de Intensidade; Radiotelescópio BINGO.



# Abstract

Cosmology has been experiencing its golden age in recent decades, whether with better and more technological experiments being produced, software capable of generating simulations as close to reality, or increasingly and more accurate databases. However, these advances give rise to more and more questions to be answered by the community, such as, for example, confirmation of the slow-roll inflationary scenario, fluctuations in the power spectrum of baryonic matter, interactions between dark matter and dark energy (DM/DE), among others. Non-Gaussianity appears as a phenomenon that may or may not be able to confirm these hypotheses, given its existence. As a tool to study this phenomenon, bispectrum proved to be one of the best statistical estimators in this direction. In this work, we present the optimization of a software, which was developed in previous work, capable of calculating the bispectrum in intensity maps and then being able to assess the existence, or not, of non-Gaussianities in cosmological observations. In addition to the optimization process, the current doctoral work has proposed using different types of data to test the capacity and analyze the non-Gaussianity existing in them. In this way, we intend to understand its applicability in many sources of information, such as BINGO radiotelescope, and seek its understanding.

**Key-words:** Cosmology; Non-Gaussianity; Bispectrum; Intensity Mapping; BINGO Radiotelescope.



# Listas de ilustrações

Figura 1 – Configuração do <i>bispectrum</i> angular. . . . .	18
Figura 2 – Mapas de todas as emissões de <i>foreground</i> , onde na primeira fileira superior temos AME, CMB e <i>Synchrotron</i> , na fileira inferior temos <i>free-free</i> , <i>FRPS</i> e a soma de todos. Esses são apresentados para o bin 11 de <i>redshift</i> e na unidade de <i>mK</i> . . . . .	25
Figura 3 – Simulação de flutuações de temperatura de brilho de 21-cm geradas pelo FLASK em <i>mK</i> para o bin 11 de <i>redshift</i> . . . . .	25
Figura 4 – A esquerda temos uma simulação do ruído térmico ( <i>white noise</i> ) para o radiotelescópio BINGO para 1 mês de observações em <i>mK</i> . A direita temos a máscara suavizada que representa a região de visualização do radiotelescópio. . . . .	26
Figura 5 – Simulação de flutuações de temperatura de brilho de 21-cm geradas por um <i>software</i> de evolução de N-corpos em <i>mK</i> para o bin 11 de <i>redshift</i> . . . . .	26
Figura 6 – Mapa de flutuações de temperatura de brilho da CMB geradas pelo <i>software</i> SEVEM a partir dos dados captados pelo telescópio Planck com a remoção do <i>foregrounds</i> , em unidade de <i>K</i> . . . . .	27
Figura 7 – Resultados do <i>bispectrum equisize</i> (em <i>mK</i> <sup>3</sup> ) para os <i>foregrounds</i> , bin 11 à esqueda e 16 à direita. O eixo das ordanadas apresenta o valor de $\ell_1$ e das abscissas o valor de $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas. Existe um corte de de amplitude máxima de mínima (10% do valor total) nos gráficos de forma a facilitar a visualização . . . . .	30
Figura 8 – Resultados do <i>bispectrum equisize</i> (em <i>mK</i> <sup>3</sup> ) para as simulações de 21-cm adicionado ruído térmico, na primeira linha, e para apenas o ruído térmico, segunda linha. A primeira coluna representa o bin 11 de <i>redshift</i> e a segunda coluna o 16. O eixo das ordanadas apresenta o valor de $\ell_1$ e das abscissas o valor de $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas. . . . .	31
Figura 9 – Resultados do <i>bispectrum equilátero</i> (em <i>mK</i> <sup>3</sup> ) em módulo para os <i>foregrounds</i> , <i>redshift</i> 11 à esqueda e 16 à direita. O valor calculado do <i>bispectrum</i> está no eixo-y e o do $\ell$ no eixo-x em escalas logarítmica para ambos os eixos. . . . .	32
Figura 10 – Comparação da amplitude dos resultado da figura anterior, onde podemos analisar as duas amplitudes dos valores de <i>bispectrum</i> (em <i>mK</i> <sup>3</sup> ) para cada bin. . . . .	32

Figura 11 – Resultados calculados para o <i>bispectrum</i> equilátero (em $mK^3$ ) em módulo para o ruído térmico à esquerda e 21-cm adicionado ao ruído à direito para o bin 11 de <i>redshift</i> . O valor calculado do <i>bispectrum</i> está no eixo-y e o do $\ell$ no eixo-x em escalas logarítmica para ambos os eixos.	33
Figura 12 – Comparaçāo entre o valor calculado do <i>bispectrum</i> equilátero (em $mK^3$ ) entre os resultados da figura anterior. A primeira metade é apresentada em log-log nos eixos x-y e a segunda metade apresentamos em ordem linear para os eixos x-y . . . . .	33
Figura 13 – Resultados do <i>bispectrum equisize</i> (em $mK^3$ ) para as simulações oriundas do <i>software</i> de N-corpos, na primeira linha, e oriundas do FLASK, segunda linha. A primeira coluna representa o bin 11 de <i>redshift</i> e a segunda coluna o 16. O eixo das ordenadas apresenta o valor de $\ell_1$ e das abscissas o valor de $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas. . . . .	34
Figura 14 – Resultados do <i>bispectrum</i> isósceles (em $mK^3$ ) para as simulações oriundas do <i>software</i> de N-corpos, na primeira linha, e oriundas do FLASK, segunda linha. A primeira coluna representa o bin 11 de <i>redshift</i> e a segunda coluna o 16. O eixo das ordenadas apresenta o valor de $\ell_1$ e das abscissas o valor de $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas. Existe um corte de de amplitude máxima de mínima (0.01% do valor total) nos gráficos de forma a facilitar a visualização. . . . .	35
Figura 15 – Resultados para o <i>bispectrum</i> equilátero (em $mK^3$ ) em módulo para todos os bins de <i>redshift</i> para simulações de 21-cm pelo <i>software</i> de N-corpos (acima) e do FLASK (abaixo), onde podemos comparar os resultados para cada bin. Os bins variam com a cor, do mais forte (bin 1) até o mais fraco (bin 30). . . . .	36
Figura 16 – Resultados para o <i>bispectrum</i> equilátero (em $mK^3$ ) em módulo para os bins 11 (duas de cima) e 16 (duas de baixo) para N-corpos (linhas 1 e 3) e FLASK (linhas 2 e 4). Esse resultado refere-se após o cálculo para 300 realizações do mesmo bin, assim calculando as variâncias. . . . .	38
Figura 17 – Resultados para o <i>bispectrum</i> equilátero (em $K^3$ ) em módulo para o mapa de CMB reconstruído pelo SEVEM após a remoção dos <i>foregrounds</i> e até o multipolo máximo de 1000 ( $\ell_{max} = 1000$ ). . . . .	39

# Sumário

<b>Introdução</b>	13
<b>1 NÃO GAUSSIANIDADE COMO UMA FERRAMENTA PARA ENTENDER O COSMOS</b>	15
<b>1.1 Não-Gaussianidade primordial</b>	16
<b>1.2 Bispectrum</b>	16
<b>2 MÓDULO PARA CALCULAR O BISPECTRUM E DESENVOLVIMENTO</b>	21
<b>2.1 Módulo de Bispectrum e seu Desenvolvimento</b>	21
<b>2.2 Modelos Escolhidos para Estudar o Bispectrum</b>	23
<b>2.2.1 Simulações de HI, Foregrounds e Ruído Branco Ligado ao BINGO</b>	24
<b>2.2.2 Comparação Entre Simulações de HI de Fontes Diferentes</b>	25
<b>2.2.3 Aplicação do Módulo a Observação do Planck 2018</b>	27
<b>2.2.4 Não-Gaussianidades Primordiais</b>	28
<b>3 RESULTADOS PRELIMINARES</b>	29
<b>3.1 Resultados para Simulações de HI com Foregrounds</b>	30
<b>3.2 Resultados para Comparação entre Simulações de HI de Diferentes Fontes</b>	33
<b>3.3 Resultados para as Observação do Planck 2018</b>	39
<b>3.4 Conclusões</b>	40
<b>4 PRÓXIMOS PASSOS E OBSERVAÇÕES</b>	41
<b>4.1 Observações</b>	41
<b>REFERÊNCIAS</b>	43



# Introdução

Com o avanço da cosmologia, novos fenômenos têm surgido para estudo. No caso do pouco conhecido, porém indubitável, Setor Escuro, é difícil fazer afirmações concretas sobre sua estrutura intrínseca. A falta de dados impede afirmar que uma nova física esteja emergindo, apesar de haver indicações de que a descrição do Setor Escuro com base apenas em um líquido pesado transparente e uma constante cosmológica pode ser insuficiente (WANG et al., 2024; BAUMANN, 2022; DODELSON; SCHMIDT, 2020). Estamos diante de uma situação semelhante àquela da interação fraca antes dos anos 60, em que a Teoria de Fermi era perfeita do ponto de vista observational, porém carente de bases teóricas sólidas.

O estudo das não-gaussianidades tem ganhado destaque com o objetivo de investigar as possíveis não-gaussianidades primordiais (originadas de uma inhomogeneidade quântica no início), que resultariam em flutuações na *Cosmic Microwave Background* (CMB) (KO-MATSU, 2002). Assim, propõe-se analisar níveis estatísticos além do espectro de potências já estudado, observando o *bispectrum* e possivelmente o *trispectrum*. Esta abordagem pode ser uma ferramenta crucial para confirmar, ou não, a hipótese do cenário inflacionário de "slow-roll", considerando sua existência.

Neste trabalho, propomos utilizar essa estratégia para analisar os campos de temperatura e estudar o *bispectrum*, que pode ser observado através de flutuações na temperatura de brilho, como no caso do radiotelescópio BINGO (*Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations*), ou através da temperatura média de brilho do céu (sinal global), ambos derivados de mapas de intensidade (IM). Para isso, empregaremos um algoritmo para otimizar um *software* já existente, desenvolvido durante o mestrado, a fim de calcular o *bispectrum*. O *bispectrum* tem se mostrado um dos melhores estimadores estatísticos para este propósito, e pretendemos continuar a avançar em seu estudo neste projeto (MELO, 2020; Fornazier et al., 2022). O objetivo é realizar análises mais aprofundadas dos fenômenos já estudados durante o mestrado, além de investigar uma gama mais ampla de dados, incluindo CMB, 21-cm, ruído branco e sua influência nas observações, *foregrounds*, não-gaussianidades primordiais e interações entre matéria e energia escura (DM/DE).

O radiotelescópio BINGO o objetivo de observar informação advinda da estrutura hiperfina do hidrogênio neutro (HI) em sua faixa de frequência de operação, de 960 a 1260 MHz, correspondente à linha de 21 cm com um redshift variando entre 0.13 e 0.48. O experimento visa observar uma região do céu de aproximadamente 15° de declinação ( $-22,5^\circ$ – $-7,5^\circ$ ) com uma resolução angular de 40 arcmin (Abdalla et al., 2022). Este é um dos focos deste trabalho, com o objetivo de investigar as não-gaussianidades que podem

estar presentes nos dados observacionais do radiotelescópio. Para isso, analisaremos a amplitude dos resultados calculados a partir de simulações, buscando compreender as possíveis não-linearidades que podem surgir nos dados.

O objetivo desta monografia é apresentar o estado atual do processo de otimização e análise de dados no projeto do *bispectrum*, junto com diferentes tipos de análises.

Este texto está organizado em quatro capítulos: no primeiro, apresentamos uma contextualização, abordando a motivação para estudar as não-gaussianidades e um breve resumo teórico. No segundo capítulo, descrevemos o desenvolvimento do módulo para cálculo do *bispectrum* e os métodos de análise selecionados até o momento. O terceiro capítulo apresenta os resultados obtidos até o momento e as conclusões derivadas deles. Por fim, no quarto capítulo, delineamos os próximos passos até a conclusão do doutorado.

# 1 Não Gaussianidade Como uma Ferramenta Para Entender o Cosmos

A não-Gaussianidade é um tópico que tem despertado crescente interesse na comunidade científica, visando encontrar explicações para fenômenos observados na cosmologia. Um dos principais objetivos ao estudar não-gaussianidades é entender o fenômeno das BAOs através da análise de ordens superiores do espectro angular, como o *bispectrum*.

O interesse em explorar não-linearidades nos dados cosmológicos aumentou após o trabalho de E. Komatsu, que investigou flutuações não-gaussianas na CMB, tanto teoricamente quanto observationalmente. Ele utilizou ferramentas como o *bispectrum* (o foco desta monografia) e o *trispectrum*, que analisam a função de correlação de 3-pontos e 4-pontos, respectivamente.

Desde então, muitos estudos têm sido realizados com o objetivo de compreender e aplicar essas ferramentas para investigar não-gaussianidades primordiais. Outro aspecto interessante é a possível existência de não-gaussianidades associadas a modelos de interação entre Matéria Escura (DM) e Energia Escura (DE) em pequenas escalas (altos multipolos). Portanto, o estudo da não-gaussianidade como uma maneira de compreender as discrepâncias encontradas no modelo padrão da cosmologia torna-se cada vez mais relevante.

Algoritmos foram desenvolvidos para estudar não-gaussianidades usando o *bispectrum* desde então. Entre eles estão os de Bucher (**BUCHER; RACINE; TENT, 2016**) e o do Smith & Zaldarriaga (**SMITH; ZALDARRIAGA, 2011**), que visam analisar não-gaussianidades a partir de mapas de intensidade de observações do céu (como Planck, COBE, WMAP, e futuramente BINGO, entre outros). O maior desafio está na criação de um módulo computacional capaz de realizar esses cálculos de maneira eficiente, como foi evidenciado em trabalhos anteriores (um dos problemas enfrentados durante o mestrado). Portanto, entender a melhor maneira de implementar esses algoritmos é um desafio por si só, e faz parte do escopo deste trabalho. Uma vez desenvolvido um método eficiente para esses cálculos, será possível estudar não-gaussianidades em uma variedade de mapas, seja em observações reais existentes (como Planck e FAST) ou em simulações de projetos futuros (como BINGO, BINGO-ABDUS e SKA).

Na próxima seção, será apresentada a teoria por trás da não-gaussianidade primordial e como podemos expressar a função de 3-pontos (*bispectrum*), a fim de utilizá-la na criação de um *software* capaz de calcular o *bispectrum*. Detalhes mais técnicos, como os passos matemáticos mais complexos, serão abordados na tese, sendo o objetivo aqui apresentar e explicar os conceitos de forma mais geral.

## 1.1 Não-Gaussianidade primordial

Conforme proposto pelos modelos inflacionários, todo o universo se origina de flutuações quânticas do inflaton, que são assumidas como gaussianas. No entanto, caso essas flutuações não sejam gaussianas, poderíamos descartar a maioria dos modelos inflacionários padrões, como o Termo Cinético Canônico, Inflação de Campo Único, *Slow-roll*, entre outros, abrindo caminho para modelos não-padrão, como Inflação de Multicampos, K-essência, e mecanismos exóticos como Pré-aquecimento, Cenário Curvaton, entre outros.

Um dos pontos cruciais é investigar a não-gaussianidade inicial a partir da noção de não-gaussianidades primordiais. Para isso, é necessário analisar a função de 3-pontos, que representa a assimetria estatística, do potencial primordial ( $\Phi$ ). Isso se torna necessário porque a função de 2-pontos, que representa a variância estatística, não é suficiente para capturar a não-linearidade presente nas não-gaussianidades primordiais. Dessa forma, a função de 3-pontos pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\langle \Phi(\mathbf{k}_1)\Phi(\mathbf{k}_2)\Phi(\mathbf{k}_3) \rangle = (2\pi)^3 \delta^{(3)}(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) B_\Phi(k_1, k_2, k_3) , \quad (1.1)$$

onde  $k_i$  é o momento do campo no espaço de fase e  $B_\Phi$  é o *bispectrum*.

O campo é descrito de forma a incorporar não-linearidades, sendo sua forma mais simples a seguinte:

$$\Phi(\mathbf{x}) = \Phi_L(\mathbf{x}) + \Phi_{NL}(\mathbf{x}) = \Phi_L(\mathbf{x}) + f_{NL} \left( \Phi_L^2(\mathbf{x}) - \langle \Phi_L^2(\mathbf{x}) \rangle \right) , \quad (1.2)$$

onde o campo é descrito a partir do campo linear, uma combinação quadrática do campo linear e seu valor médio, e um fator multiplicativo não linear ( $f_{NL}$ ). Nossa objetivo é, portanto, desenvolver um algoritmo capaz de estimar o parâmetro  $f_{NL}$  utilizando o *bispectrum* presente na equação (1.1).

Nosso primeiro desafio aqui é reescrever o *bispectrum* do espaço de fases em um *bispectrum* no espaço de momentos angulares ( $m$ 's e  $\ell$ 's), pois é assim que podemos extrair informações das observações de mapas de intensidade (IM). As equações (1.1) e (1.2) descrevem a teoria, e o próximo trecho descreverá como podemos extrair informações do *bispectrum* de uma observação com distribuição angular.

## 1.2 Bispectrum

Como mencionado anteriormente, no caso de flutuações não-gaussianas, a média e a variância não são suficientes para descrever todas as propriedades da distribuição de informação presente no campo. Portanto, é necessário considerar ordens superiores do espectro angular. Ao contrário do caso de campos gaussianos, essas ordens superiores não serão nulas.

O primeiro termo de ordem superior que podemos estudar é a assimetria, parametrizada como uma função de correlação de 3-pontos. Esta função é representada pela sua contraparte harmônica, chamada de *bispectrum* angular ( $B_{\ell_1 \ell_2 \ell_3}$ ), que é o principal foco deste trabalho. Ela é definida por:

$$\langle a_{\ell_1 m_1} a_{\ell_2 m_2} a_{\ell_3 m_3} \rangle = \langle B_{\ell_1 \ell_2 \ell_3} \rangle \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix} . \quad (1.3)$$

A derivação do *bispectrum* decorre da função angular de  $n$ -pontos, onde  $n = 3$ , e é descrita como:

$$\langle a_{\ell_1 m_1} a_{\ell_2 m_2} a_{\ell_3 m_3} \rangle = \sum_{\text{all } m'} \left\langle a_{\ell_1 m'_1} a_{\ell_2 m'_2} a_{\ell_3 m'_3} \right\rangle D_{m'_1 m_1}^{(\ell_1)} D_{m'_2 m_2}^{(\ell_2)} D_{m'_3 m_3}^{(\ell_3)} , \quad (1.4)$$

o termo  $D_{m' m}^{(\ell)} = \ell, m' |D\ell, m$  é o elemento de matriz que descreve a rotação finita de um estado inicial  $(\ell, m)$  para um estado final  $(\ell, m')$ , enquanto  $a_{\ell m}$  é o coeficiente associado aos harmônicos esféricos.

Neste ponto, aplicamos propriedades específicas das matrizes de rotação para casos em que estamos lidando com mais de três multipolos. Essas propriedades estão detalhadas na literatura (KOMATSU, 2002; ROTENBERG, 1959). A partir disso, desenvolvemos a equação (1.4), utilizando essas propriedades até obtermos o resultado descrito na equação (1.3). Detalhes completos das contas estarão na tese, visto que incluí-los aqui estenderia muito o texto com uma grande quantidade de equações.

O resultado obtido é invariante por rotações. As matrizes observadas nas equações anteriores são conhecidas como símbolos de Wigner-3j (ROTENBERG, 1959). Para que o *bispectrum* forme um triângulo, as relações entre os momentos angulares  $\ell_1$ ,  $\ell_2$  e  $\ell_3$  devem obedecer à desigualdade triangular  $|\ell_1 - \ell_2| \leq \ell_3 \leq \ell_1 + \ell_2$  para qualquer permutação dos índices. Além disso, devido à invariância por paridade, a soma  $\ell_1 + \ell_2 + \ell_3$  deve ser par.

O símbolo de Wigner-3j descreve o acoplamento entre dois momentos angulares, representando a dependência do *bispectrum* com o ângulo azimutal, garantindo que o *bispectrum* forme um triângulo. Para ilustrar seu funcionamento, considere dois estados com momentos angulares  $(\ell_1, m_1)$  e  $(\ell_2, m_2)$ , que formam um estado acoplado com um terceiro  $(\ell_3, m_3)$ . Esses três momentos formam um triângulo cuja orientação é descrita por  $m_1$ ,  $m_2$  e  $m_3$ , satisfazendo a propriedade  $m_1 + m_2 + m_3 = 0$ . Quando o sistema é rotacionado, o símbolo de Wigner-3j transforma os  $m$ 's, preservando a configuração triangular do sistema. Da mesma forma, a invariância por rotação do *bispectrum* exige que os triângulos formados em configurações equivalentes forneçam a mesma amplitude, independentemente de sua orientação na observação. Assim, o símbolo de Wigner-3j descreve a dependência do ângulo azimutal no *bispectrum*.

Os formatos triangulares do *bispectrum*, conforme apresentados na Figura (1), podem ser escolhidos durante o cálculo. Para este trabalho, optamos por três tipos de triângulos: isósceles, *equisize* (REGAN; SHELLARD, 2010) e equilátero. Na configura-

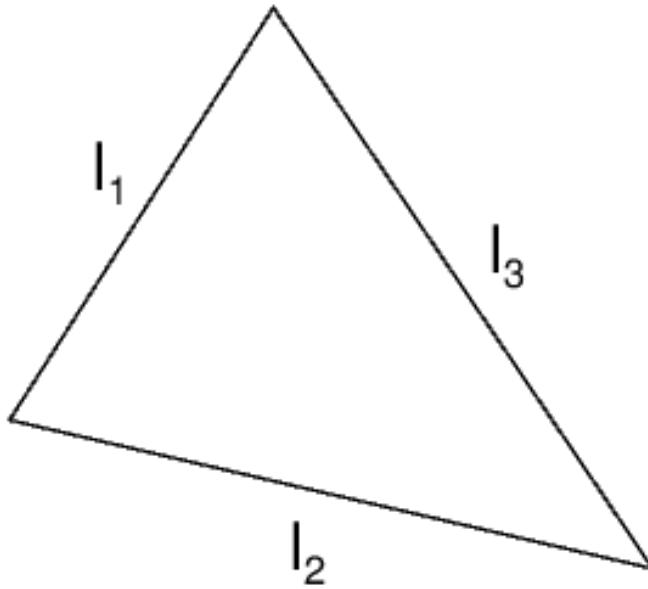


Figura 1 – Configuração do *bispectrum* angular.

ção *equisize*, calculamos o *bispectrum* para triângulos com o mesmo perímetro, ou seja,  $\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 = \ell_0$ . Na configuração isósceles, calculamos o *bispectrum* para todos os triângulos isósceles, onde dois dos valores de  $\ell$  são iguais, ou seja,  $\ell_1 = \ell_2 \neq \ell_3$ ,  $\ell_1 = \ell_3 \neq \ell_2$  ou  $\ell_3 = \ell_2 \neq \ell_1$ . Enquanto na configuração equilátero, calculamos o *bispectrum* considerando que os três valores dos multipolos sejam iguais, ou seja,  $\ell_1 = \ell_2 = \ell_3$ . Uma explicação mais detalhada sobre a escolha desses formatos e como os parâmetros são determinados será apresentada no capítulo (Capítulo 2) onde apresentaremos a metodologia de trabalho.

Para obtermos um estimador sem tendência, invertemos a equação (1.3) com o auxílio da identidade:

$$\sum_{m'_1 m'_2} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ m'_1 & m'_2 & m'_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & L \\ m'_1 & m'_2 & M' \end{pmatrix} = \frac{\delta_{\ell_3 L} \delta_{m'_3 M'}}{2L + 1} , \quad (1.5)$$

assim obtendo

$$B_{\ell_1 \ell_2 \ell_3} = \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix} a_{\ell_1 m_1} a_{\ell_2 m_2} a_{\ell_3 m_3} . \quad (1.6)$$

Além deste formato, é possível reescrever esta equação utilizando a transformação harmônica azimutalmente média do campo esférico original ( $e_\ell(\hat{\mathbf{n}})$ ) definida como

$$e_\ell(\hat{\mathbf{n}}) = \sqrt{\frac{4\pi}{2\ell + 1}} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\hat{\mathbf{n}}) , \quad (1.7)$$

e a identidade,

$$\begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \left( \frac{(2\ell_1 + 1) + (2\ell_2 + 1) + (2\ell_3 + 1)}{4\pi} \right)^{-\frac{1}{2}} \times \int \frac{d^2 \hat{\mathbf{n}}}{4\pi} Y_{\ell_1 m_1}(\hat{\mathbf{n}}) Y_{\ell_2 m_2}(\hat{\mathbf{n}}) Y_{\ell_3 m_3}(\hat{\mathbf{n}}) , \quad (1.8)$$

aplicando estas duas definições na equação (1.6) obtemos,

$$B_{\ell_1 \ell_2 \ell_3} = \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \int \frac{d^2 \hat{\mathbf{n}}}{4\pi} e_{\ell_1}(\hat{\mathbf{n}}) e_{\ell_2}(\hat{\mathbf{n}}) e_{\ell_3}(\hat{\mathbf{n}}) . \quad (1.9)$$

O resultado obtido é computacionalmente mais eficiente, permitindo o cálculo rápido dos  $e_\ell(\hat{\mathbf{n}})$  por meio de uma transformada harmônica esférica. Como mencionado anteriormente, os dados são computados para cada direção  $\hat{\mathbf{n}}$  no céu.

Com os resultados apresentados neste capítulo, torna-se possível realizar o estudo do *bispectrum*. No entanto, antes disso, é necessário escolher um algoritmo apropriado. Durante o projeto, foram analisados os algoritmos propostos por Smith & Zaldarriaga ([SMITH; ZALDARRIAGA, 2011](#)) e Bucher ([BUCHER; RACINE; TENT, 2016](#)), além de outros estudados por Komatsu ([KOMATSU, 2002](#)) e Troja ([TROJA et al., 2017](#)). Esses algoritmos foram considerados para compreender e aprimorar o projeto, e ao final decidimos adotar o algoritmo proposto por Bucher. Dessa forma, desenvolvemos um módulo computacional para estudar a não-Gaussianidade em dados simulados da cosmologia de 21cm.

No próximo capítulo, detalharemos a descrição do algoritmo escolhido para este trabalho e como conseguimos aprimorá-lo satisfatoriamente, uma vez que vem sendo desenvolvido desde o mestrado. Além disso, explicaremos os modelos de análise de *bispectrum* escolhidos e os projetos em andamento que utilizam essa ferramenta.



## 2 Módulo para Calcular o Bispectrum e Desenvolvimento

### 2.1 Módulo de Bispectrum e seu Desenvolvimento

O *bispectrum* é uma função de correlação angular de três pontos de um campo. Portanto, devemos descrevê-lo como uma função que envolve três objetos, que, no nosso caso, são pontos no céu (nossos pontos de informação) em mapas ou simulações do céu (nossos campos). Optamos por seguir o algoritmo descrito por Bucher (??), que aborda o *bispectrum* como uma análise direta dos mapas de intensidade, realizando uma transformada harmônica esférica e utilizando seus coeficientes,  $a_{\ell m}$ , como as quantidades essenciais para o cálculo do *bispectrum*. A abordagem desse algoritmo para o cálculo do *bispectrum* é bastante coerente, e podemos utilizar funções de pacotes já existentes para a implementação do módulo.

Para iniciar a elaboração do módulo, começamos com o *bispectrum* escrito na forma da seguinte expressão:

$$B_{\ell_1 \ell_2 \ell_3} = \int d\Omega M_{\ell_1}(\Omega) M_{\ell_2}(\Omega) M_{\ell_3}(\Omega) , \quad (2.1)$$

onde  $M_\ell(\Omega)$  é um mapa em função da posição  $\Omega$  na esfera celeste.

Sendo essa a forma do nosso *bispectrum* angular. No entanto, para que seja feito o cálculo utilizando as simulações descritas nas seções anteriores, é necessário desenvolver esta equação um pouco mais. Então, aplicamos uma decomposição dos mapas em hamônicos esféricos

$$M_\ell(\Omega) = \sum_{m=-\ell}^{+\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\Omega) , \quad (2.2)$$

e substituímos essa decomposição na equação anterior (2.1), onde obtemos

$$B_{\ell_1 \ell_2 \ell_3} = \int d\Omega \sum_{m_1, m_2, m_3} Y_{\ell_1 m_1}(\Omega) Y_{\ell_2 m_2}(\Omega) Y_{\ell_3 m_3}(\Omega) a_{\ell_1 m_1} a_{\ell_2 m_2} a_{\ell_3 m_3} . \quad (2.3)$$

A integral que depende da posição  $\Omega$  na esfera celeste, descrita na equação acima, atua apenas sobre os harmônicos esféricos. Essa integral é bem conhecida e é chamada de integral de *Gaunt*, cuja solução é conhecida e está descrita abaixo

$$\int d\Omega Y_{\ell_1 m_1}(\Omega) Y_{\ell_2 m_2}(\Omega) Y_{\ell_3 m_3}(\Omega) = \sqrt{N_\Delta^{\ell_1 \ell_2 \ell_3}} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix} . \quad (2.4)$$

Com esta forma de se escrever a integral da equação (2.2), podemos então reescrever a equação em sua forma final, como ela é usada em nosso módulo para calcular o

bispectrum,

$$B_{\ell_1 \ell_2 \ell_3} = \sqrt{N_{\Delta}^{\ell_1 \ell_2 \ell_3}} \sum_{m_1, m_2, m_3} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix} a_{\ell_1 m_1} a_{\ell_2 m_2} a_{\ell_3 m_3} , \quad (2.5)$$

onde

$$N_{\Delta}^{\ell_1 \ell_2 \ell_3} \equiv \frac{(2\ell_1 + 1) + (2\ell_2 + 1) + (2\ell_3 + 1)}{4\pi} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_2 & \ell_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} , \quad (2.6)$$

é um fator de normalização,  $a_{\ell_i m_i}$  é o coeficiente harmônico esférico de um mapa  $i$ , com  $\ell$  entre  $0 \leq \ell \leq \ell_{max}$  e  $m$  entre  $-\ell_{max} \leq m \leq \ell_{max}$ , e a matriz é o símbolo Wigner-3j.

Desse modo, apresentamos a versão do *bispectrum* que adaptamos para o nosso módulo. No entanto, durante sua criação, foi necessário levar em consideração as mesmas restrições já mencionadas ao longo desta monografia no capítulo anterior. O algoritmo foi desenvolvido em sua maior parte durante o trabalho de mestrado. Entretanto, ao final do mesmo, percebemos a necessidade de aprimorar seu desempenho. Essa primeira etapa resultou na publicação do artigo V do projeto BINGO ([Fornazier et al., 2022](#)), o qual foi publicado durante o primeiro ano do doutorado.

Conforme mencionado anteriormente, identificamos a necessidade de melhorias no software desenvolvido. Nosso principal problema era a lentidão ao calcular o *bispectrum* para valores de multipolos ( $\ell$ ) superiores a 60. Para resolver isso, precisávamos encontrar uma nova abordagem para calcular a integral de Gaunt (2.4), que foi o principal ponto de atualização em nosso código. Para isso, utilizamos a relação de recorrência apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} -\sqrt{(\ell_3 \mp m_3)(\ell_3 \pm m_3 + 1)} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_1 & \ell_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 \mp 1 \end{pmatrix} = \\ \sqrt{(\ell_1 \mp m_1)(\ell_1 \pm m_1 + 1)} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_1 & \ell_1 \\ m_1 \mp 1 & m_2 & m_3 \end{pmatrix} + \\ + \sqrt{(\ell_2 \mp m_2)(\ell_2 \pm m_2 + 1)} \begin{pmatrix} \ell_1 & \ell_1 & \ell_1 \\ m_1 & m_2 \mp 2 & m_3 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Com esta equação, propomos escrevê-la como uma equação matricial do tipo

$$Cw = v \quad (2.8)$$

onde  $C$  é uma matriz de coeficientes da equação (2.7),  $w$  é um vetor contendo os símbolos de Wigner-3j que desejamos determinar e  $v$  é um vetor contendo os símbolos de Wigner-3j com valores conhecidos (necessários para a recursão). Usamos então um método de resolução matricial por decomposição LU para resolver o sistema.

Se o sistema for solúvel, ou seja, se houver mais equações do que variáveis a serem determinadas, aplicamos a solução por decomposição LU de forma direta. Por outro lado, se o sistema não for solúvel, ou seja, se houver mais variáveis a serem determinadas do

que equações disponíveis, utilizamos a decomposição LU com pivotação parcial para obter as matrizes  $L$  (*lower*),  $U$  (*upper*) e  $P$  (*pivô*). Em seguida, resolvemos a matriz *lower* e utilizamos seu resultado para resolver a matriz *upper*, permitindo-nos resolver o sistema. Isso é feito multiplicando a transposta da matriz *pivô* pelo resultado da matriz *lower*.

Essa atualização resultou em um significativo aumento de velocidade nos cálculos do *bispectrum*, cerca de 50 a 60 vezes mais rápido. Isso nos permitiu expandir significativamente o alcance da análise, incluindo multipolos da ordem de 300 a 1000, como será mostrado nos resultados.

No entanto, ainda era necessário realizar mais uma atualização no código: a parallelização do mesmo. Essa atualização se mostrou necessária para possibilitar a análise de mais resultados, calculando o *bispectrum* de várias simulações (ou mapas reais) simultaneamente, além de permitir estudos estatísticos, como a geração de barras de erro e a análise do  $\chi^2$ . Portanto, dedicamos uma parte significativa do doutorado ao aprendizado de métodos de paralelização, obtendo sucesso ao aplicá-los ao software. Embora ainda sejam necessárias melhorias na implementação da paralelização, estamos em um estágio em que o código pode ser utilizado, e estamos começando a gerar os primeiros resultados da análise do *bispectrum* usando esse novo recurso.

Para a construção do nosso módulo para calcular o *bispectrum*, utilizamos funções encontradas nos pacotes Healpy (ou Healpix) (GORSKI et al., 2005) e no Sympy (MEURER et al., 2017). As explicações detalhadas de seus funcionamentos podem ser encontradas em suas respectivas documentações.

## 2.2 Modelos Escolhidos para Estudar o Bispectrum

Como mencionado no Capítulo 1, o *bispectrum* forma triângulos, o que nos leva a escolher os tipos de triângulos que vamos analisar. Neste trabalho, consideramos três tipos de combinações de triângulos, um a mais do que no trabalho de mestrado (MELO, 2020): Isósceles, Equilátero e *Equisize*. Essas são restrições adicionais impostas ao módulo, além das discutidas no Capítulo 1. A seguir, explicamos como cada um desses casos funciona:

- Isósceles: O caso isósceles é uma restrição adicional que adicionamos ao cálculo do *bispectrum*, onde a combinação dos valores de  $\ell$  é da seguinte forma:

$$\ell_1 = \ell_2 \leq \ell_3$$

- *Equisize*: Neste caso, a restrição adicionada ao cálculo é:

$$\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 = \ell_0$$

onde escolhemos o melhor valor para  $\ell_0$  dependendo da situação a ser estudada.

- Equilátero: Este é uma nova escolha de forma de triângulo para calcular o *bispectrum* que foi adicionado após o início do trabalho do Doutorado e traz a seguinte restrição:

$$\ell_1 = \ell_2 = \ell_3$$

Desse modo, com essas escolhas de formas de calcular o *bispectrum*, podemos passar para o próximo passo: escolher quais serão as análises realizadas. Nas próximas seções, apresentarei os tipos de dados a serem analisados neste trabalho, e no capítulo de resultados serão apresentados os resultados obtidos até o momento para cada uma dessas escolhas.

### 2.2.1 Simulações de HI, Foregrounds e Ruído Branco Ligado ao BINGO

Nossa primeira escolha de estudo neste trabalho é semelhante à apresentada no artigo V do projeto BINGO (Fornazier et al., 2022). Nosso objetivo é realizar uma nova análise com base no que foi apresentado, agora utilizando a nova versão do código do *bispectrum*. Para isso, utilizamos três tipos de simulações para criar uma simulação bastante semelhante ao que é esperado do radiotelescópio BINGO, incluindo os *foregrounds*, ruído branco/térmico (*white noise*), a informação de 21-cm (HI) e uma máscara para simular a região de observação do radiotelescópio. Neste caso, escolhemos analisar apenas o caso *equisize* inicialmente.

A primeira etapa é preparar os *foregrounds*. Utilizamos uma simulação gerada pelo PSM (Delabrouille et al., 2013). Entre os tipos de ruídos externos disponíveis, temos: *Anomalous Microwave Emission* (AME), *Cosmic Microwave Background* (CMB), *Synchrotron Emission*, *Free-Free Emission*, *Faint Radio Point Sources* (FRPS). Os detalhes de cada uma dessas simulações e como funcionam fisicamente podem ser encontrados em trabalhos dentro do grupo (MELO, 2020; MARINS, 2023), mas uma descrição detalhada também será incluída na tese. Abaixo (Figura 2), são apresentadas imagens de como ficam essas distribuições em uma simulação do céu.

Na segunda etapa, preparamos uma simulação do que esperamos observar do Hidrogênio Neutro. Para isso, utilizamos o software FLASK (Xavier; Abdalla; Joachimi, 2016), que nos permitiu transformar o sinal simulado em um sinal log-normal (MOTTA; ABDALLA, 2021). Dessa forma, construímos uma simulação da distribuição de 21-cm do céu. A Figura 3 apresenta uma visualização dessa distribuição.

Por fim, geramos simulações de ruído branco para serem adicionadas como um componente de ruído à distribuição e analisarmos sua influência nos resultados finais. Além disso, utilizamos uma máscara do céu para restringir nossa análise à região do céu onde o radiotelescópio BINGO observará. Na Figura ??, apresentamos a máscara e uma das simulações de ruído branco já aplicadas à região do BINGO.

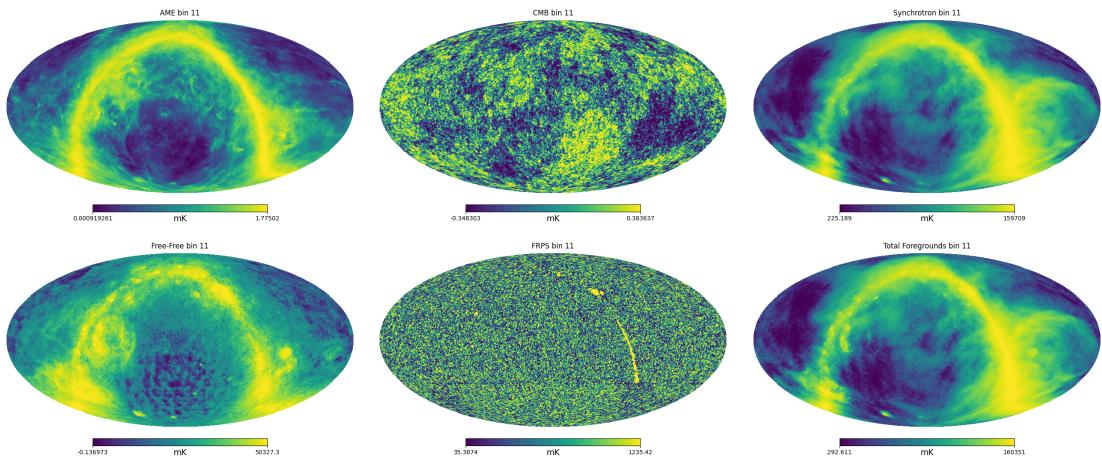


Figura 2 – Mapas de todas as emissões de *foreground*, onde na primeira fileira superior temos AME, CMB e *Synchrotron*, na fileira inferior temos *free-free*, *FRPS* e a soma de todos. Esses são apresentados para o bin 11 de *redshift* e na unidade de *mK*.

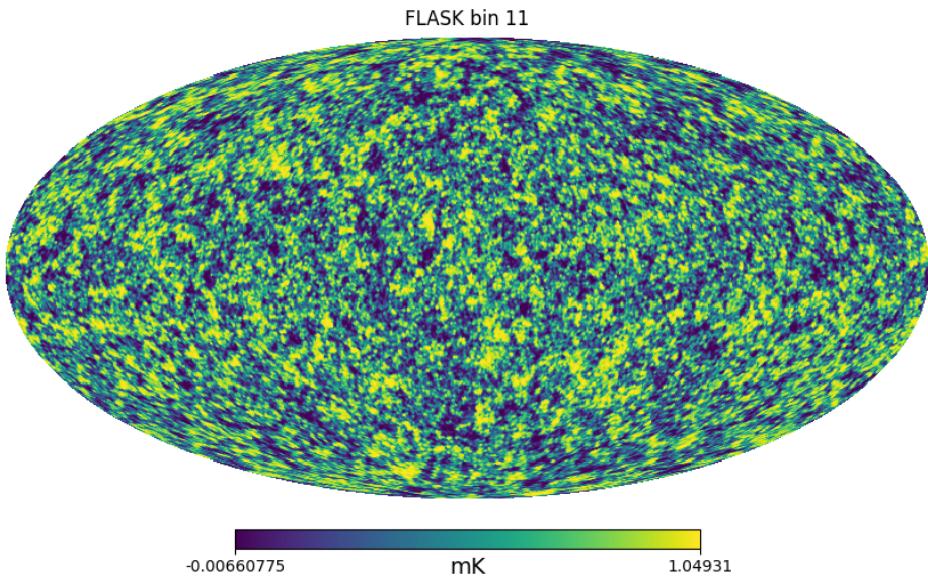


Figura 3 – Simulação de flutuações de temperatura de brilho de 21-cm geradas pelo FLASK em *mK* para o bin 11 de *redshift*.

### 2.2.2 Comparação Entre Simulações de HI de Fontes Diferentes

Nossa segunda escolha de análise focou na investigação da não-gaussianidade em duas simulações de HI provenientes de fontes distintas. Para essa análise, utilizamos as duas fontes de simulação, aplicando também a máscara que delimita a área de observação do BINGO. Os três casos de triângulos (*equisize*, isósceles e equilátero) foram analisados em relação aos 30 intervalos de observação do radiotelescópio. No caso do triângulo equilátero, realizamos uma análise estatística adicional, utilizando 300 simulações dos mesmos mapas gerados com diferentes *seeds*.

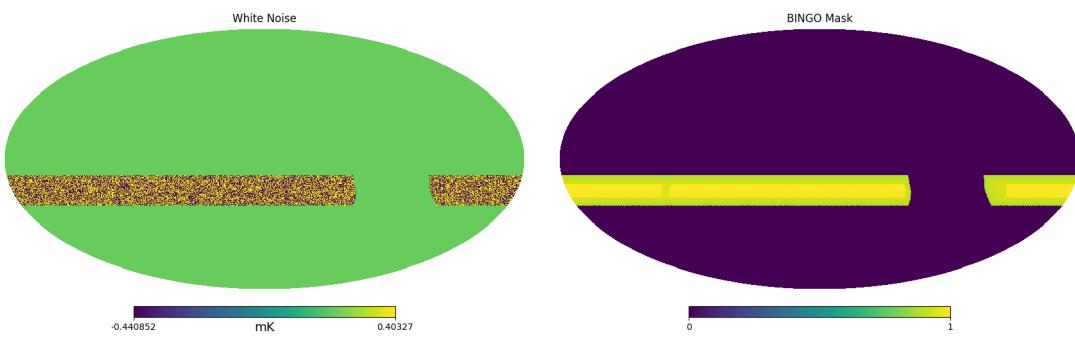


Figura 4 – A esquerda temos uma simulação do ruído térmico (*white noise*) para o radiotelescópio BINGO para 1 mês de observações em  $mK$ . A direita temos a máscara suavizada que representa a região de visualização do radiotelescópio.

Além das simulações log-normal geradas pelo FLASK, conforme mencionado na seção anterior, para essa análise, empregamos um *software* de evolução de N-corpos. Este *software*, detalhadamente descrito no paper VI (Zhang et al., 2022) do projeto BINGO, é um código de evolução de N-corpos que popula os halos das galáxias com gás de hidrogênio neutro. Em seguida, calcula a densidade deste HI e, por fim, determina a temperatura de brilho do HI para gerar uma caixa que simula o universo em um determinado momento. Na figura a seguir (5), apresentamos uma das simulações de N-corpos utilizadas neste estudo. Dessa forma, obtivemos uma simulação de 21-cm de uma fonte distinta, indo além do espectro de potências usualmente empregado.

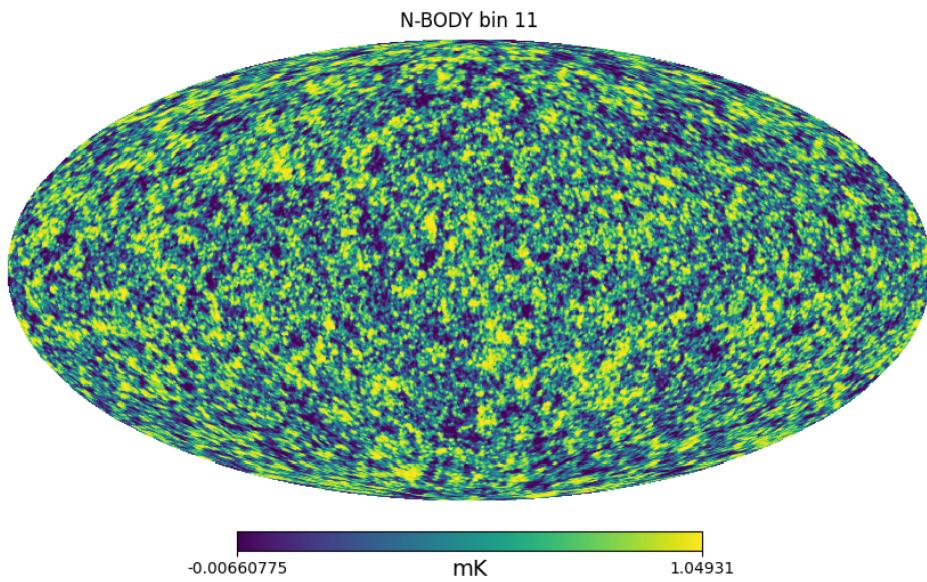


Figura 5 – Simulação de flutuações de temperatura de brilho de 21-cm geradas por um *software* de evolução de N-corpos em  $mK$  para o bin 11 de *redshift*.

Com esses dois tipos de simulações, podemos analisar o comportamento do *bispectrum* em diferentes cenários de observação celeste. Nos resultados, apresentaremos algumas

das descobertas obtidas até o momento nessas análises comparativas.

### 2.2.3 Aplicação do Módulo a Observação do Planck 2018

A última análise a ser apresentada nesta monografia do trabalho de doutorado é o estudo do *bispectrum* em uma observação da CMB. Para isso, optamos por analisar dados reais obtidos pelo telescópio Planck (Planck Collaboration et al., 2020a; Planck Collaboration et al., 2020b), os quais foram disponibilizados para uso público em 2018<sup>1</sup>. Utilizamos a reconstrução da CMB com frequência de 70 GHz feita pelo *software* SEVEM, o qual já realiza a remoção dos *foregrounds*. Vale ressaltar que também poderíamos utilizar dados de CMB gerados por outras ferramentas de reconstrução. A seguir (6), apresentamos a simulação que está sendo utilizada em nosso trabalho.

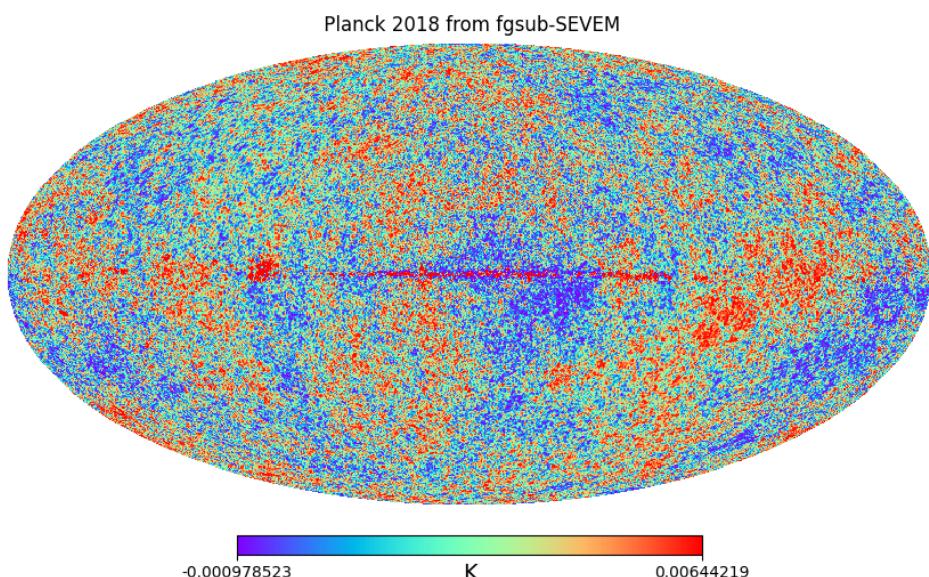


Figura 6 – Mapa de flutuações de temperatura de brilho da CMB geradas pelo *software* SEVEM a partir dos dados captados pelo telescópio Planck com a remoção do *foregrounds*, em unidade de  $K$ .

Nossa intenção é analisar a possível não-gaussianidade presente nas observações da CMB e, ao mesmo tempo, testar os limites do módulo. Nossa principal objetivo é realizar análises em um nível de interação elevado ( $\ell \sim 800 - 1000$ , ou mais), visto que uma das metas do trabalho é investigar, em um futuro próximo, modelos de interação entre matéria escura e energia escura. Portanto, o estudo dos dados da CMB serve como um teste inicial para o código desenvolvido. Inicialmente, planejamos calcular o *bispectrum* para o modelo equilátero, mas não descartamos a possibilidade de analisar outros modelos também.

<sup>1</sup> <https://pla.esac.esa.int/>

## 2.2.4 Não-Gaussianidades Primordiais

Uma das análises mais intrigantes para o projeto é a investigação da não-gaussianidade primordial. Atualmente, estamos colaborando com membros da equipe do radiotelescópio BINGO para gerar simulações de N-corpos, introduzindo não-gaussianidades primordiais como parte da evolução do universo (*informação de background*), com um certo fator de não-linearidade ( $f_{NL}$ ).

No entanto, essa abordagem de criação de simulações e análises está em estágio inicial, e, portanto, não dispomos de resultados preliminares para apresentar neste momento. Recentemente, durante uma visita à China, tivemos discussões produtivas nas Universidades de Yangzhou (YZU) e Ciência e Tecnologia da China (USTC). Durante essa visita, exploramos a possibilidade de criar essas simulações em colaboração com o Prof. Jiajun Zhang, do Observatório Astronômico de Shanghai (SHAO), e discutimos maneiras de trabalhar em conjunto com o Prof. Yu Sang, da YZU, que está envolvido em uma modelagem teórica da não-gaussianidade primordial, visando estudar esse fenômeno. Sendo assim, apresento este tópico na monografia como algo que está sendo desenvolvido até o presente momento de escrita da mesma.

### 3 Resultados Preliminares

Neste capítulo, faremos a apresentação dos resultados obtidos até o momento, os quais representam apenas uma parte do conjunto total de resultados já alcançados e em desenvolvimento. Muito trabalho tem sido realizado e há potencial para várias publicações em breve, algumas delas já estão em processo de escrita. A proposta deste trabalho é desenvolver uma ferramenta capaz de estudar a não-gaussianidade em diferentes níveis utilizando mapas de intensidade, ou seja, diretamente a partir de dados observacionais. Desta forma, teremos uma ferramenta capaz de realizar uma verificação cruzada de teorias de não-gaussianidade para determinar qual delas melhor se adequa aos dados analisados. Além disso, poderemos utilizar essa ferramenta para investigar resquícios de informações de fontes altamente não-gaussianas que possam aparecer como resíduos na reconstrução de informações reais de um experimento.

As análises apresentadas neste capítulo foram baseadas nas escolhas feitas para cada tipo de análise, conforme explicado no capítulo anterior. Com exceção do caso das não-gaussianidades primordiais, que está em estágio avançado de discussão interna, mas ainda sem simulações realizadas. Cada vez que analisamos simulações de 21-cm, ou qualquer outro tipo de simulação, estamos olhando para mapas celestes previstos para o radiotelescópio BINGO. O BINGO observará uma área do céu correspondente à declinação entre aproximadamente  $-22.5^\circ$  e  $-7.5^\circ$  em coordenadas celestes, com resolução angular de 40 arcmin. Observará na faixa de frequência de 960-1260 MHz (correspondente a redshifts entre 0.13 e 0.48), dividida em 30 canais. Portanto, as simulações foram geradas (21-cm e *foregrounds*) para cada canal com base nessas especificações. Todos os mapas são pixe-lizados com HEALPix ( $N_{side} = 256$ ), com uma máscara representando apenas a região observada pelo radiotelescópio. Os mapas de ruído térmico (branco) foram criados com uma configuração de sistema de 70K, 28 cornetas coletoras e 1 mês de observação, conforme em outros trabalhos que analisam previsões para o BINGO. Devido à resolução dos mapas simulados para o BINGO e à intensidade da informação de 21-cm (0,2 0,6mK), limitaremos o estudo a uma abertura angular de até aproximadamente  $0.4^\circ$  ( $l_{max} = 300$ ).

Em uma das análises mencionadas no capítulo anterior, calcularemos a não-gaussianidade nos dados da CMB, utilizando as reconstruções disponíveis nos arquivos públicos do experimento Planck de 2018. Mais especificamente, utilizaremos a reconstrução feita pelo software SEVEM, já com os *foregrounds* subtraídos dos dados. Optamos por realizar uma análise de céu inteiro dos dados, conforme publicados no Planck Legacy Archive, com uma escolha de  $l_{max} = 1000$ , e pequenas aberturas angulares, devido ao interesse em estudar a não-gaussianidade em um nível que permita examinar possíveis interações entre matéria e energia escuras. Além disso, poderemos analisar estruturas com aberturas an-

gulares maiores ( $l \sim 300$ ), como está sendo feito nas simulações de 21-cm. Isso é facilitado principalmente pela resolução dos dados públicos do Planck..

A partir deste ponto, apresentaremos os resultados preliminares do trabalho e discutiremos as informações que podemos extrair até o momento desses resultados.

### 3.1 Resultados para Simulações de HI com Foregrounds

Os primeiros resultados apresentados nesta subseção são cálculos do *bispectrum equisize* para os *foregrounds* (ver Figura 7). A figura exibe os valores calculados do *bispectrum* espelhados no zero do eixo-x ( $\ell_2 - \ell_3$ ), enquanto o eixo-y varia de  $\ell_1$  de 0 a 100. Vale ressaltar que optamos por manter a soma dos multipoles igual a 300 para este caso, indo até no máximo o multipolo 300 em qualquer um deles, para os *bins* de *redshift* 11 e 16 do BINGO. Além disso, aplicamos um corte de amplitude para garantir que os valores máximos e mínimos apresentados não excedam 10% das amplitudes máximas e mínimas calculadas.

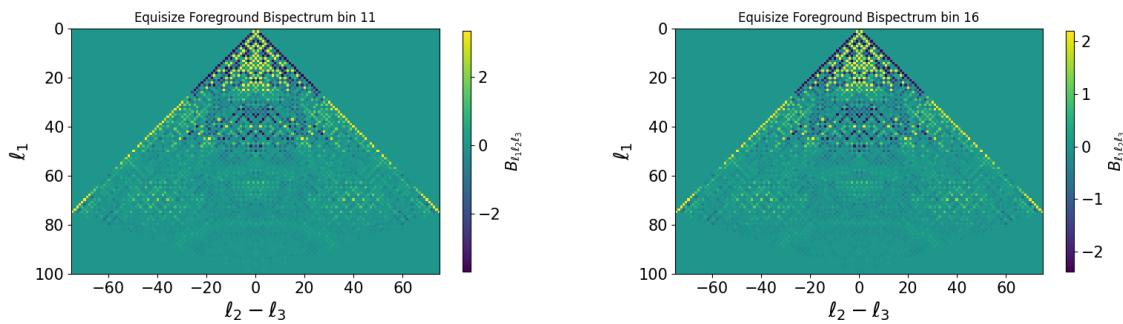


Figura 7 – Resultados do *bispectrum equisize* (em  $mK^3$ ) para os *foregrounds*, bin 11 à esqueda e 16 à direita. O eixo das ordenadas apresenta o valor de  $\ell_1$  e das abscissas o valor de  $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas. Existe um corte de amplitude máxima de 10% do valor total) nos gráficos de forma a facilitar a visualização

Podemos observar o primeiro comportamento esperado nos resultados. Os *foregrounds* exibem valores altos (da ordem de  $10^0$ ) devido à sua alta não-gaussianidade. Outro comportamento esperado é que a forma da figura bidimensional obtida para esse cálculo se mantenha ao variarmos o *redshift*, com mudanças apenas na amplitude final. Isso ocorre porque as principais fontes de não-gaussianidade mantêm amplitudes altas, independentemente do *redshift* observado, comparativamente aos valores de intensidade para dados como os que serão apresentados a seguir, de 21-cm adicionado ao ruído térmico.

Na Figura (8), apresentamos os resultados para os mesmos *bins* anteriores e a mesma configuração amostral. Podemos observar que a informação do hidrogênio neutro possui

uma intensidade maior do que a informação do ruído térmico ( $10^{-10}$  em comparação com  $10^{-12}$ ) para a configuração *equisize*. Esses resultados, juntamente com as figuras apresentadas até o momento, estão em processo de publicação como parte de um livro, após serem apresentados em um evento internacional<sup>1</sup>.

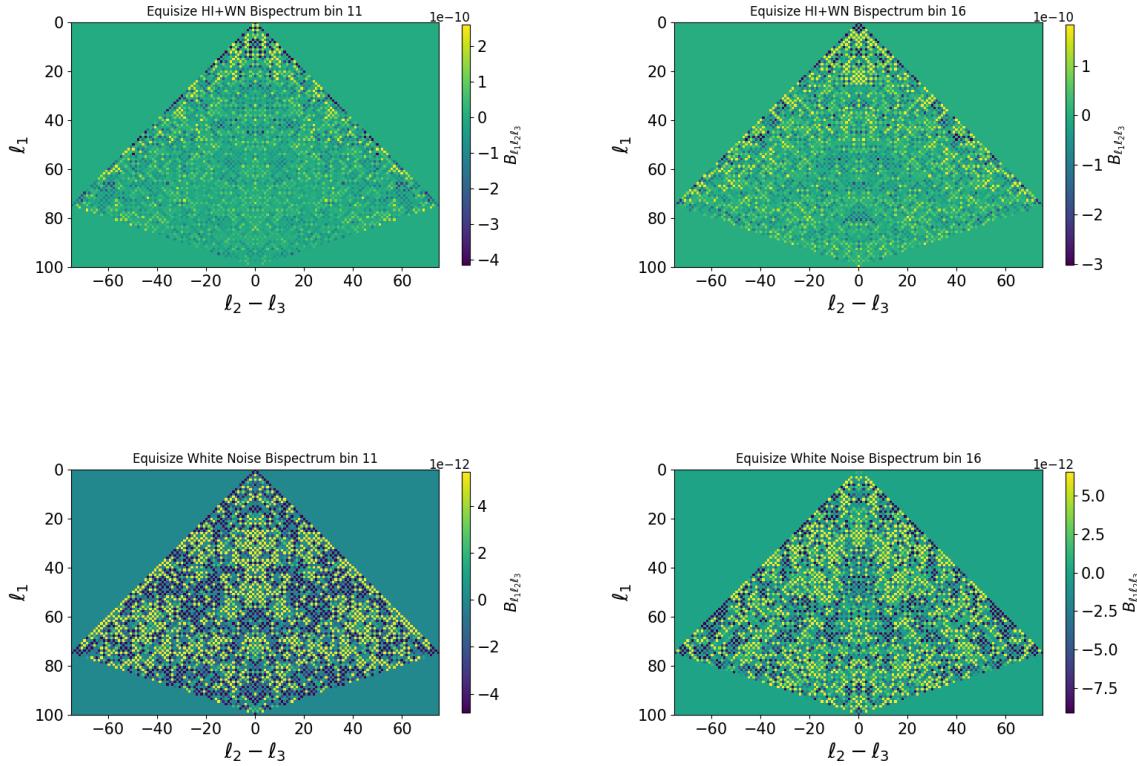


Figura 8 – Resultados do *bispectrum equisize* (em  $mK^3$ ) para as simulações de 21-cm adicionado ruído térmico, na primeira linha, e para apenas o ruído térmico, segunda linha. A primeira coluna representa o bin 11 de *redshift* e a segunda coluna o 16. O eixo das ordenadas apresenta o valor de  $\ell_1$  e das abscissas o valor de  $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas.

Analizando esses resultados, surge a dúvida sobre o comportamento do *bispectrum* quando os multipolos ultrapassam 100, pois, de acordo com estudos em andamento sobre o espectro de potência (que estão em processo de publicação por membros do grupo), o impacto do ruído térmico torna-se de intensidade similar. Para investigar isso, estamos realizando a análise do caso equilátero. Nas Figuras (9) e (10), apresentamos um dos primeiros resultados usando o caso do *bispectrum* equilátero, em módulo, para os *bins* 11 (à esquerda) e 16 (à direita) dos *foregrounds*, conforme anteriormente apresentado. Podemos perceber que as curvas têm a mesma forma e que, após o multipolo 100, a amplitude do *bispectrum* cai rapidamente. Além disso, podemos observar que o *bin* mais

<sup>1</sup> 11th Aegean Summer School

próximo (11) tem uma amplitude de *foregrounds* maior do que o *bin* mais distante (16), tornando-se um caso interessante para investigação.

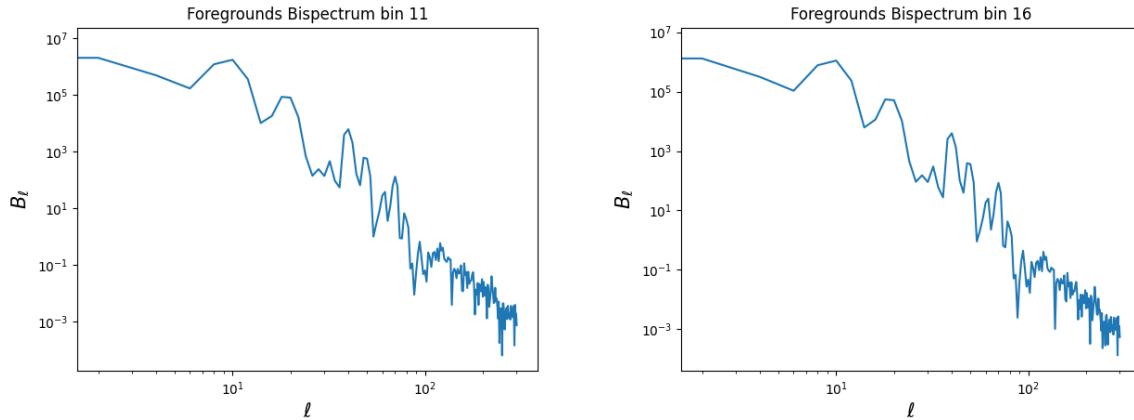


Figura 9 – Resultados do *bispectrum* equilátero (em  $mK^3$ ) em módulo para os *foregrounds*, *redshift* 11 à esqueda e 16 à direita. O valor calculado do *bispectrum* está no eixo-y e o do  $\ell$  no eixo-x em escalas logarítmica para ambos os eixos.

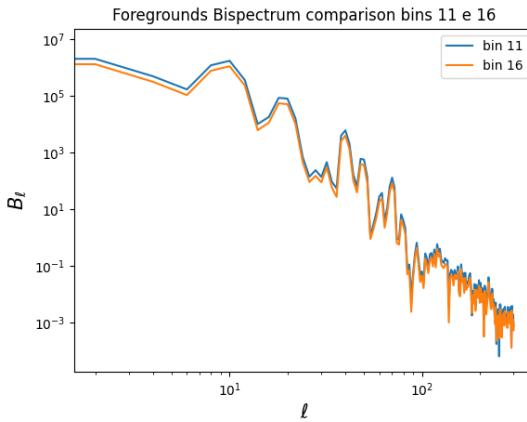


Figura 10 – Comparação da amplitude dos resultado da figura anterior, onde podemos analisar as duas amplitudes dos valores de *bispectrum* (em  $mK^3$ ) para cada bin.

Nas figuras (11 e 12), apresentamos o cálculo do bispectrum equilátero, em módulo, para o *bin* 11 em simulações do ruído térmico (à esquerda) e HI adicionado com o ruído térmico (à direita) na primeira imagem, e uma comparação entre os dois na imagem seguinte, onde a escala é mudada a partir do multipolo 100. É possível perceber que, a partir do  $\ell > 100$ , ocorre uma mistura do sinal de HI com o ruído, tornando-se difícil o reconhecimento de ambos os sinais. Esse é um resultado que também é observado ao estudarmos o espectro de potências dos sinais de 21-cm e do ruído simulado para o BINGO (como citado anteriormente, esse trabalho está em processo de publicação por outro membro do grupo).

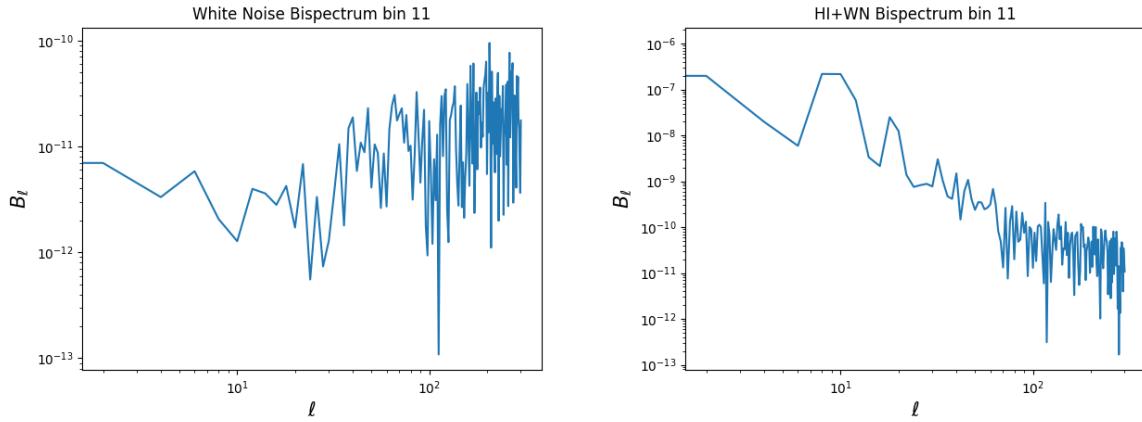


Figura 11 – Resultados calculados para o *bispectrum* equilátero (em  $mK^3$ ) em módulo para o ruído térmico à esquerda e 21-cm adicionado ao ruído à direita para o bin 11 de *redshift*. O valor calculado do *bispectrum* está no eixo-y e o do  $\ell$  no eixo-x em escalas logarítmica para ambos os eixos.

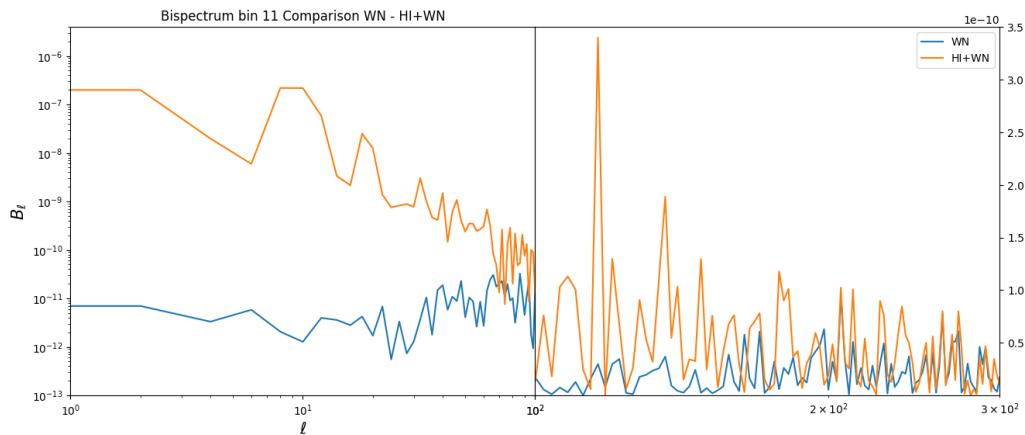


Figura 12 – Comparaçāo entre o valor calculado do *bispectrum* equilátero (em  $mK^3$ ) entre os resultados da figura anterior. A primeira metade é apresentada em log-log nos eixos x-y e a segunda metade apresentamos em ordem linear para os eixos x-y

### 3.2 Resultados para Comparação entre Simulações de HI de Diferentes Fontes

Nesta subseção, estaremos apresentando os resultados preliminares com o objetivo de comparar as simulações de 21-cm de duas fontes diferentes: uma simulação de N-corpos e uma simulação log-normal (FLASK). Na figura (13), apresentamos o valor calculado para o bispectrum no caso *equisize* com a mesma configuração apresentada anteriormente ( $\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 = 300$  com  $\ell_{max} = 300$ ), mas com as amplitudes totais calculadas. A primeira informação que percebemos foi que o bispectrum não tem a mesma forma mudando o *bin* estudado. Outro ponto que observamos é que a fonte de origem parece mudar bastante a forma dos resultados, mesmo olhando para o mesmo *redshift*, apesar das intensidades serem

similares. No entanto, assim como observamos na subseção anterior, podemos investigar mais a fundo o caso equilátero, como falarei mais adiante nesta subseção.

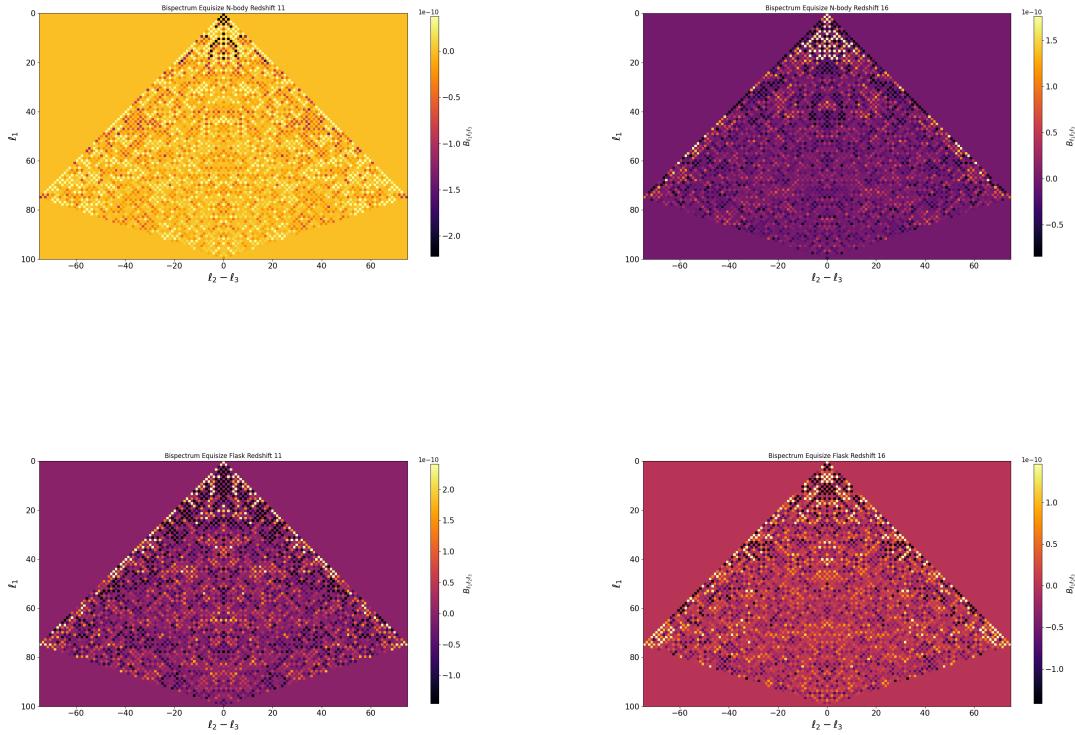


Figura 13 – Resultados do *bispectrum equisize* (em  $mK^3$ ) para as simulações oriundas do *software* de N-corpos, na primeira linha, e oriundas do FLASK, segunda linha. A primeira coluna representa o bin 11 de *redshift* e a segunda coluna o 16. O eixo das ordenadas apresenta o valor de  $\ell_1$  e das abscissas o valor de  $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas.

A figura (14) apresenta os resultados para o caso isósceles, onde os valores de  $\ell_3$  são representados no eixo das ordenadas e  $\ell_1 = \ell_2$  no eixo das abscissas, com  $\ell_{max} = 150$  devido ao alto custo computacional para calcular esses bispectra (existem muitas interações entre os  $\ell$ 's, o que aumenta o tempo de cálculo). Para apresentar os valores calculados neste caso, precisamos aplicar um corte de amplitudes significativo para conseguir observar alguma informação (0,01% da amplitude total). Isso ocorre porque há picos de informação nos  $\ell$ 's baixos neste caso, e as amplitudes caem rapidamente depois. O principal ponto a ser observado é que começa a aparecer outra região com um novo pico em torno de  $\ell \geq 130$ , o que se torna um ponto de estudo para entender o motivo disso ocorrer.

Dados os resultados apresentados anteriormente, avançamos para o estudo do caso equilátero. Na Figura (15), apresento os valores calculados para o bispectrum no caso equilátero, em módulo, para todos os redshifts simulados para o BINGO, usando a ferramenta

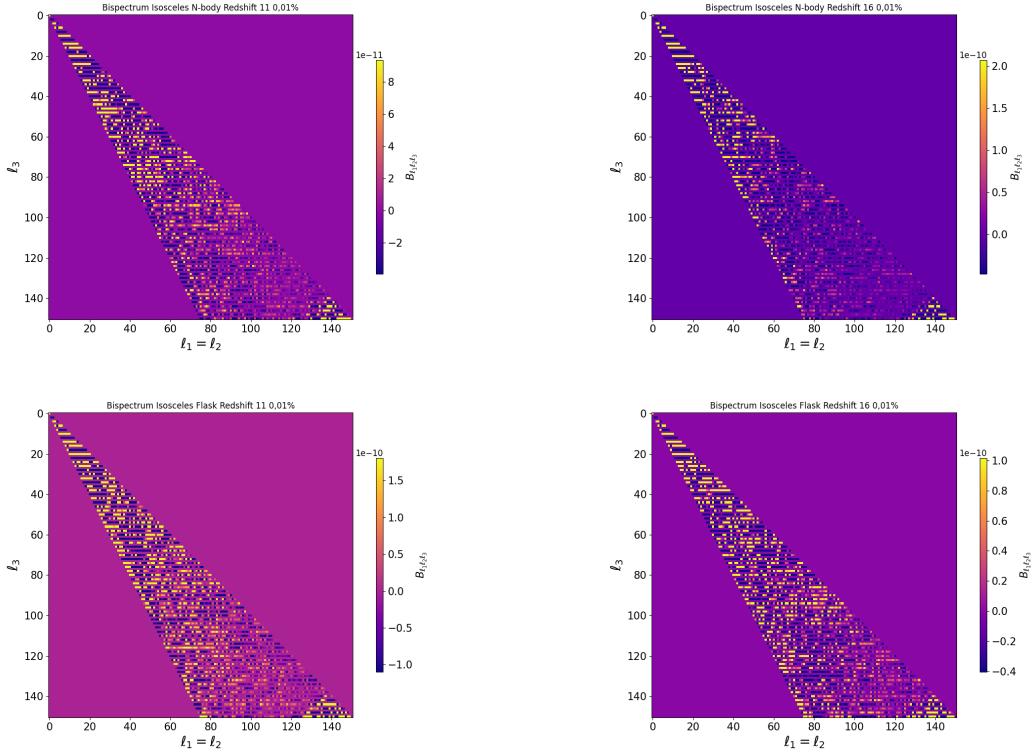


Figura 14 – Resultados do *bispectrum* isósceles (em  $mK^3$ ) para as simulações oriundas do *software* de N-corpos, na primeira linha, e oriundas do FLASK, segunda linha. A primeira coluna representa o bin 11 de *redshift* e a segunda coluna o 16. O eixo das ordenadas apresenta o valor de  $\ell_1$  e das abscissas o valor de  $\ell_2 - \ell_3$ . A direita e esquerda (de cada figura) são espelhados a partir do valor 0 das abscissas. Existe um corte de de amplitude máxima de mínima (0.01% do valor total) nos gráficos de forma a facilitar a visualização.

de N-corpos (topo) e o FLASK (baixo). Optamos por estudar até o valor máximo de multipolo igual a 300, conforme na subseção anterior. É possível observar um comportamento semelhante para ambas as fontes das simulações, onde notamos variações nos valores de amplitude de cada uma. Isso sugere que ambas as fontes das simulações operam de forma similar para gerá-las. Além disso, é perceptível que a forma da curva é consistente entre elas, o que confere credibilidade aos valores calculados do bispectrum.

No entanto, é necessário realizar uma análise mais aprofundada dos comportamentos e das conclusões que podemos extrair desses casos. Para isso, começamos a investigar a estatística dos resultados do bispectrum. Utilizamos a simulação original gerada para cada fonte (N-corpos e FLASK) e empregamos o pacote HEALPix para produzir novas simulações utilizando o mesmo espectro de potências, porém com seeds diferentes, gerando assim múltiplas simulações do mesmo bin. Estamos conduzindo a análise com 300 recreações das simulações para cada redshift, pois são calculados 150 valores de bispectrum para cada mapa, utilizando um  $\ell_{max} = 300$ .

Na figura a seguir (16), apresentamos os resultados da análise estatística para os bins

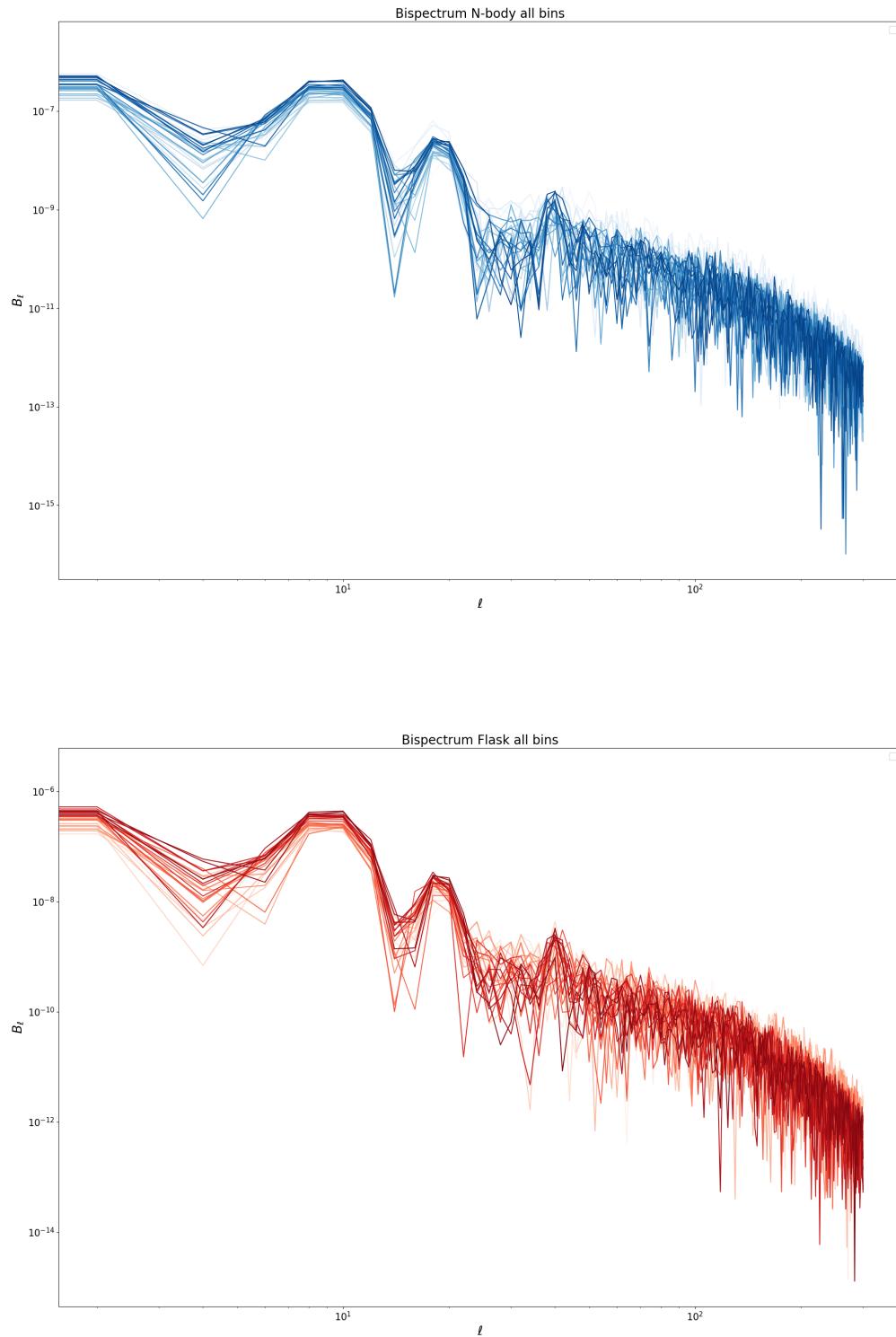


Figura 15 – Resultados para o *bispectrum* equilátero (em  $mK^3$ ) em módulo para todos os bins de *redshift* para simulações de 21-cm pelo *software* de N-corpos (acima) e do FLASK (abaixo), onde podemos comparar os resultados para cada bin. Os bins variam com a cor, do mais forte (bin 1) até o mais fraco (bin 30).

11 (os dois gráficos da parte superior) e 16 (os dois gráficos da parte inferior). O gráfico superior é referente à simulação de N-corpos, enquanto o inferior é relativo à simulação do FLASK..

Em ambos os casos, observamos a primeira característica esperada das simulações, que são quasi-gaussianas. O FLASK é gerado utilizando uma distribuição log-normal a partir de um espectro de potências previamente gaussiano, enquanto as simulações de N-corpos empregam a física da 21-cm como pano de fundo. Ao analisar os resultados, notamos que a maioria das barras de erro toca o zero dentro de  $1\sigma$  ou  $2\sigma$ , e apenas alguns pontos não seguem essa observação. No entanto, é importante ressaltar que as amplitudes desses pontos são bastante baixas.

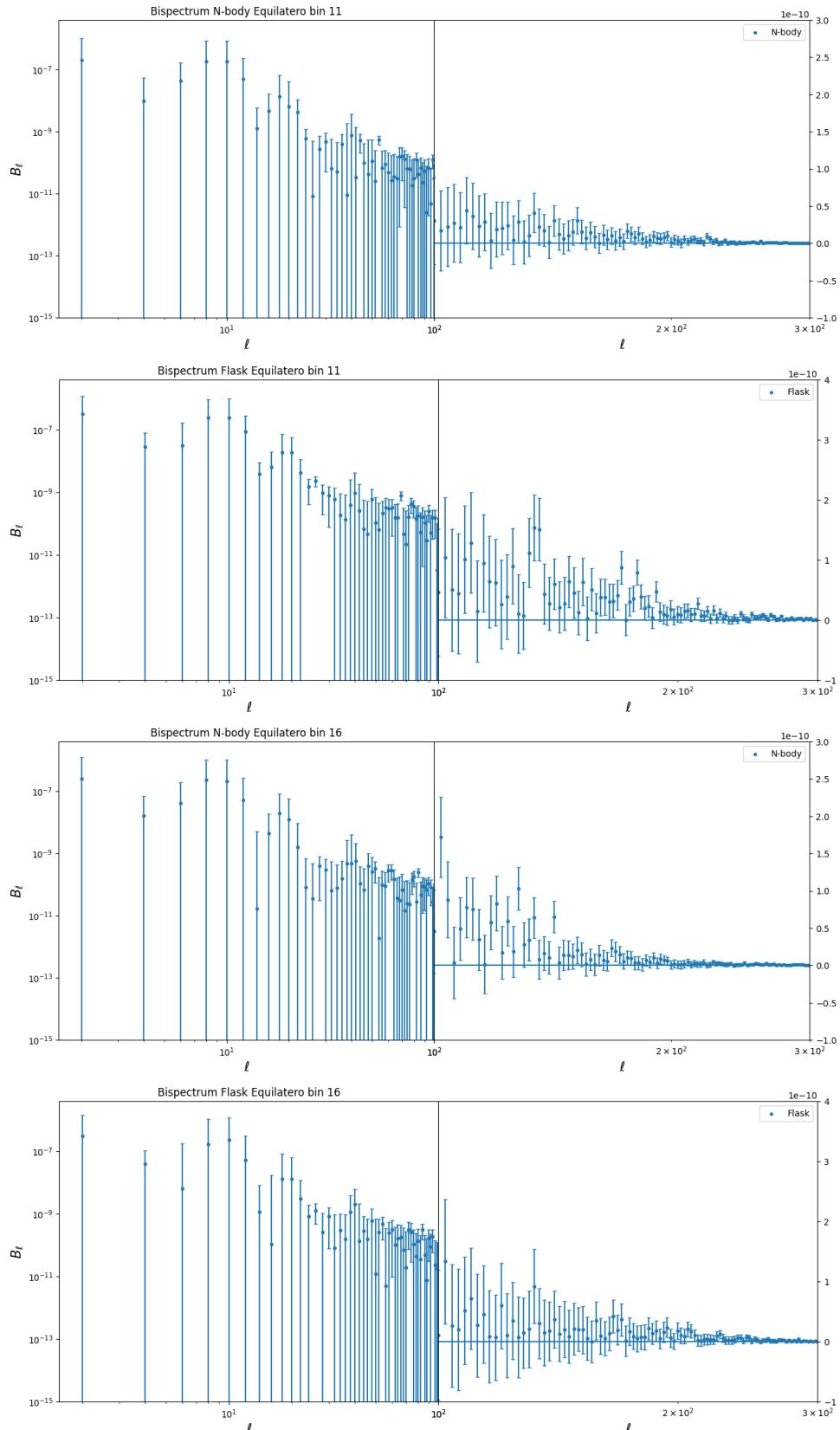


Figura 16 – Resultados para o *bispectrum* equilátero (em  $mK^3$ ) em módulo para os bins 11 (duas de cima) e 16 (duas de baixo) para N-corpos (linhas 1 e 3) e FLASK (linhas 2 e 4). Esse resultado refere-se após o cálculo para 300 realizações do mesmo bin, assim calculando as variâncias.

### 3.3 Resultados para as Observação do Planck 2018

Como uma última aplicação até o estágio atual do desenvolvimento do trabalho, optamos por analisar um dos conjuntos de dados do Planck 2018 (como explicado nas seções anteriores) para investigar o comportamento do software de cálculo do bispectrum em um mapa da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (CMB), especialmente em altos múltiplos  $\ell \sim 1000$ . Na Figura (17), apresentamos o primeiro resultado obtido ao calcular o bispectrum, em módulo, para um mapa de CMB. Uma observação inicial revela flutuações nos valores calculados, como observado nos casos anteriores. No entanto, a curva exibe uma tendência para amplitudes na ordem de  $10^{-20}$ . Além disso, é possível notar regiões onde parecem existir picos de informação, principalmente em baixos multipolos, tornando-se pontos de interesse para análises adicionais até a conclusão do projeto.

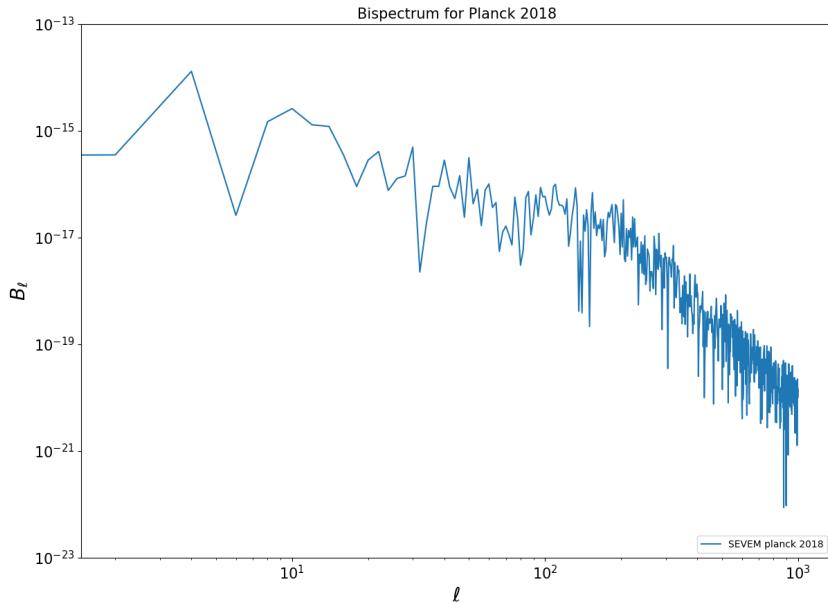


Figura 17 – Resultados para o *bispectrum* equilátero (em  $K^3$ ) em módulo para o mapa de CMB reconstruído pelo SEVEM após a remoção dos *foregrounds* e até o multipolo máximo de 1000 ( $\ell_{max} = 1000$ ).

### 3.4 Conclusões

Nas conclusões dos resultados até o momento, ficou evidente que possuímos um *software* robusto, que se mostrou bastante útil tanto para nosso grupo de pesquisa interno quanto para o radiotelescópio BINGO. A análise inicial apresentada servirá como base para melhorar os resultados do Paper V do BINGO (Fornazier et al., 2022) (do qual sou um dos autores principais), proporcionando uma análise mais abrangente, com uma maior quantidade de multipolos. A seguir, apresentamos uma análise do bispectrum para simulações provenientes de duas fontes diferentes. Esses resultados corroboram o que tem sido observado nos estudos de espectros de potência, o que sugere ser um trabalho promissor. As análises estatísticas também seguem em uma direção promissora, embora demandem mais tempo computacional para serem finalizadas. Por fim, apresentamos o primeiro resultado obtido a partir de uma observação de CMB, mas análises mais detalhadas precisam ser realizadas e já foram iniciadas, incluindo uma análise estatística mais aprofundada.

# 4 Próximos Passos e Observações

Com base no que foi apresentado nesta monografia e no progresso do projeto até o momento, estamos agora embarcando na análise do bispectrum de vários tipos de dados. Neste sentido, nossos objetivos incluem investigar os resíduos presentes em mapas reconstruídos por ferramentas de reconstrução de informações, tais como GNILC, FastICA e GMCA ([MARINS, 2023](#); [Fornazier et al., 2022](#)). Além disso, durante uma visita à China e em colaboração com parceiros, estamos gerando simulações de N-corpos com não-gaussianidade primordial para estudarmos o bispectrum nesse tipo de mapa e compreender o seu comportamento.

Também temos como objetivo finalizar o estudo do mapa de CMB atual e analisar outros tipos de mapas de CMB reconstruídos a partir dos dados do Planck 2018 ([Planck Collaboration et al., 2020a](#); [Planck Collaboration et al., 2020b](#)), que estão disponíveis livremente, como o Commander ou o SMICA. Por fim, pretendemos utilizar o módulo de cálculo do bispectrum em modelos de interação de matéria e energia escura (DM/DE), modelos que estão sendo estudados internamente em nosso grupo, e esperamos realizar simulações e aplicar o *software* em breve.

## 4.1 Observações

Como tem sido apresentado nos relatórios anuais, o trabalho com o estudo de não-gaussianidades não é o único empreendimento realizado pelo aluno de doutorado responsável por esta monografia. Além disso, venho auxiliando em pesquisas relacionadas ao estudo de modelos de interação de matéria escura e energia escura (DM/DE). Também estou envolvido no estudo de *pink noise* associado aos SKARABS, que serão utilizados no radiotelescópio BINGO, e tenho colaborado com os próximos passos no trabalho de *Fast Radio Bursts* (FRBs) ([SANTOS et al., 2024](#)) , que pretende analisar dados de diversos radiotelescópios, incluindo aqueles previstos para observação pelo BINGO.



# Referências

- Abdalla, E. et al. The BINGO project. I. Baryon acoustic oscillations from integrated neutral gas observations. , v. 664, p. A14, ago. 2022. Citado na página [13](#).
- BAUMANN, D. *Cosmology*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2022. Citado na página [13](#).
- BUCHER, M.; RACINE, B.; TENT, B. van. The binned bispectrum estimator: template-based and non-parametric cmb non-gaussianity searches. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, IOP Publishing, v. 2016, n. 05, p. 055, 2016. Citado 2 vezes nas páginas [15](#) e [19](#).
- Delabrouille, J. et al. The pre-launch Planck Sky Model: a model of sky emission at submillimetre to centimetre wavelengths. , v. 553, p. A96, maio 2013. Citado na página [24](#).
- DODELSON, S.; SCHMIDT, F. *Modern cosmology*. [S.l.]: Academic press, 2020. Citado na página [13](#).
- Fornazier, K. S. F. et al. The BINGO project. V. Further steps in component separation and bispectrum analysis. , v. 664, p. A18, ago. 2022. Citado 5 vezes nas páginas [13](#), [22](#), [24](#), [40](#) e [41](#).
- GORSKI, K. M. et al. Healpix: A framework for high-resolution discretization and fast analysis of data distributed on the sphere. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 622, n. 2, p. 759, 2005. Citado na página [23](#).
- KOMATSU, E. The pursuit of non-gaussian fluctuations in the cosmic microwave background. *arXiv preprint astro-ph/0206039*, 2002. Citado 3 vezes nas páginas [13](#), [17](#) e [19](#).
- MARINS, A. *Técnicas de separação de componentes aplicadas ao radiotelescópio BINGO*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2023. Citado 2 vezes nas páginas [24](#) e [41](#).
- MELO, J. V. d. *Pipeline do projeto BINGO e não gaussianidade*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2020. Citado 3 vezes nas páginas [13](#), [23](#) e [24](#).
- MEURER, A. et al. Sympy: symbolic computing in python. *PeerJ Computer Science*, PeerJ Inc., v. 3, p. e103, 2017. Citado na página [23](#).
- MOTTA, P. C. B. d. C. R.; ABDALLA, E. Projeto bingo: vínculos cosmológicos a partir de simulações de mapas de intensidade de hi. 2021. Citado na página [24](#).
- Planck Collaboration et al. Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. , v. 641, p. A6, set. 2020. Citado 2 vezes nas páginas [27](#) e [41](#).
- Planck Collaboration et al. Planck 2018 results. XII. Galactic astrophysics using polarized dust emission. , v. 641, p. A12, set. 2020. Citado 2 vezes nas páginas [27](#) e [41](#).

- REGAN, D.; SHELLARD, E. Cosmic string power spectrum, bispectrum, and trispectrum. *Physical Review D*, APS, v. 82, n. 6, p. 063527, 2010. Citado na página 17.
- ROTENBERG, M. The 3-j and 6-j symbols. (*No Title*), 1959. Citado na página 17.
- SANTOS, M. V. dos et al. The bingo project-ix. search for fast radio bursts—a forecast for the bingo interferometry system. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 681, p. A120, 2024. Citado na página 41.
- SMITH, K. M.; ZALDARRIAGA, M. Algorithms for bispectra: forecasting, optimal analysis and simulation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 417, n. 1, p. 2–19, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 19.
- TROJA, A. et al. Angular high-order correlation functions in cosmology: Lss bispectrum and cmb trispectrum. Università degli Studi di Milano, 2017. Citado na página 19.
- WANG, B. et al. Further understanding the interaction between dark energy and dark matter: current status and future directions. *Reports on Progress in Physics*, IOP Publishing, 2024. Citado na página 13.
- Xavier, H. S.; Abdalla, F. B.; Joachimi, B. Improving lognormal models for cosmological fields. , v. 459, n. 4, p. 3693–3710, jul. 2016. Citado na página 24.
- Zhang, J. et al. The BINGO project. VI. H I halo occupation distribution and mock building. , v. 664, p. A19, ago. 2022. Citado na página 26.