



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

# ESTUDO DAS OSCILAÇÕES ACÚSTICAS DE BÁRIONS E SIMULAÇÕES DE OBSERVAÇÕES COM O RADIOTELESCÓPIO BINGO

Juliana Akemi Takahashi Vieira

Relatório de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientado pelo  
Dr. Carlos Alexandre Wuenche e  
pela Dra. Mariana Penna Lima.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE  
São José dos Campos  
2024

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

# ESTUDO DAS OSCILAÇÕES ACÚSTICAS DE BÁRIONS E SIMULAÇÕES DE OBSERVAÇÕES COM O RADIOTELESCÓPIO BINGO

Juliana Akemi Takahashi Vieira

Relatório de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientado pelo  
Dr. Carlos Alexandre Wuenche e  
pela Dra. Mariana Penna Lima.

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE  
São José dos Campos  
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Sobrenome, Nomes.

Cutter      Estudo das oscilações acústicas de bárions e simulações de observações com o radiotelescópio BINGO / Nome Completo do Autor1; Nome Completo do Autor2. – São José dos Campos : INPE, 2024.

xv + 33 p. ; ()

Dissertação ou Tese (Mestrado ou Doutorado em Nome do Curso) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, AAAA.

Orientador : José da Silva.

1. Palavra chave. 2. Palavra chave 3. Palavra chave. 4. Palavra chave. 5. Palavra chave I. Título.

CDU 000.000

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](#).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](#).

Informar aqui sobre marca registrada (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

Informar aqui sobre fontes financiadoras (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

**ATENÇÃO! A FOLHA DE  
APROVAÇÃO SERÁ IN-  
CLUIDA POSTERIORMENTE.**

Mestrado ou Doutorado em Nome do  
Curso



## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).



## RESUMO

Neste trabalho apresentamos a análise dos processos físicos relevantes para a cosmologia de 21 cm, a fenomenologia das oscilações acústicas de bárions (do inglês, Baryon acoustic oscillations - BAOs) e os métodos de produção de mapas utilizados pelo radiotelescópio BINGO (inglês, BAO from Integrated Neutral Gas Observations). As BAOs são uma consequência do acoplamento entre a matéria e a radiação após o período inflacionário, cuja interação se dava principalmente através de processos de espalhamento Compton. Este fenômeno é caracterizado por uma série de compressões e rarefações provenientes da competição entre a pressão da radiação e a interação gravitacional, originando ondas de densidade que se propagavam pelo plasma primordial. A emissão de 21 cm por HI (Hidrogênio Neutro) cósmico será detectada pelo BINGO empregando a técnica do mapeamento de intensidade (inglês, intensity mapping - IM), que surgiu como uma abordagem promissora. O mapeamento consiste em realizar observações em rádio de baixa resolução angular  $\theta \geq 20^\circ - 30^\circ$  para medir a radiação integrada de 21 cm de grandes regiões do céu contendo muitas galáxias, sem resolvê-las individualmente. Com o objetivo de simular as observações que serão feitas com o BINGO, está sendo utilizada uma pipeline de IM desenvolvida pela Universidade de Manchester, com várias contribuições recentes do grupo de cosmologia do INPE, que produz séries temporais (inglês, time ordered data - TOD) e mapas de temperatura da distribuição de HI em um determinado volume do Universo. Através da produção de mapas (inglês, Map Making), as informações fornecidas pelas TODs são convertidas em representações bidimensionais, sem comprometer os dados. Tal cartografia, é responsável por reunir os detalhes da direção de apontamento do telescópio em um dado momento com os dados ordenados pelo tempo, funcionando como uma etapa intermediária que precede a separação de componentes (técnica de remoção de ruídos observacionais e sistemáticos) e a obtenção do mapa final do HI.

Palavras-chave: Cosmologia de 21 cm. Radioastronomia. Oscilações acústicas de bárions. Produção de mapas.



# STUDY OF ACOUSTIC OSCILLATIONS OF BARYONS AND SIMULATIONS OF OBSERVATIONS WITH THE BINGO RADIO TELESCOPE

## ABSTRACT

In this work we present the analysis of the physical processes relevant to 21 cm cosmology, the phenomenology of baryon acoustic oscillations (BAOs) and the mapping methods used by the BINGO (BAO for Integrated Neutral Gas Observations) radio telescope. BAOs are a consequence of the shadow between matter and radiation after the inflationary period, whose interaction occurred mainly through Compton scattering processes. This feature is characterized by a series of compressions and rarefactions arising from the competition between radiation pressure and gravitational interaction, originating density waves that propagated through the primordial plasma. The 21 cm emission by cosmic HI (Neutral Hydrogen) will be blocked by BINGO using the intensity mapping (IM) technique, which has emerged as a promising approach. Mapping consists of performing low-resolution radio observations ( $\theta \geq 20^\circ - 30^\circ$ ) to measure the 21 cm integrated radiation of large regions of the sky containing many galaxies, without resolving them individually. In order to simulate the observations that will be made with BINGO, an IM pipeline developed by the University of Manchester is being used, with several recent contributions from the INPE cosmology group, which produces time series (TOD) and temperature maps of the HI distribution in a given volume of the Universe. Through map making, the information provided by the TODs is converted into two-dimensional representations, without compromising the data. This cartography is responsible for bringing together the details of the telescope's pointing direction at a given time with the time-ordered data, functioning as an involved step that precedes the separation of components (a technique for removing observational and systematic noise) and the delivery of the final HI map.

Keywords: 21 cm Cosmology. Radio astronomy. Baryon acoustic oscillations. Map making.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Diagrama da evolução do Universo. . . . .	3
2.2 Mapa da Radiação Cósmica de Fundo. . . . .	5
2.3 Galáxias em alguns anéis formados pelas flutuações de densidade primordiais. . . . .	6
2.4 Gráfico da função de correlação de dois pontos . . . . .	7
2.5 Representação artística do telescópio BINGO. . . . .	9
2.6 Espectro de potência da matéria . . . . .	10
2.7 Gráfico de contorno Energia Escura . . . . .	11
3.1 Perfis com o tempo de integração aumentado. . . . .	17
3.2 Simulação do ruído 1/f para MI. . . . .	19
3.3 Série temporal do ruído térmico. . . . .	20
3.4 Distribuição gaussiana do ruído térmico. . . . .	20
3.5 Série temporal do ruído térmico + ruído 1/f para temperaturas de sistema diferentes. . . . .	21
3.6 Mapa do ruído térmico. . . . .	23
3.7 Mapa do HI observado + ruído térmico. . . . .	24
3.8 Mapa do HI observado + ruído térmico + ruído 1/f. . . . .	25
3.9 Mapa do HI observado + ruído térmico + ruído 1/f + RFI + síncrotron + free-free. . . . .	26



## LISTA DE SÍMBOLOS

$t$	–	tempo
$k$	–	constante de Boltzmann
$S$	–	função fonte
$I$	–	intensidade específica
$\nu$	–	frequência da radiação
$\Delta\nu$	–	canal de frequências
$n_c$	–	número de cornetas
$t_{obs}$	–	tempo de integração
$\Omega_{pix}$	–	ângulo sólido do feixe
$\Omega_{sur}$	–	ângulo sólido da área observada do céu
$\nu_{samp}$	–	frequência de amostragem
$f_{knee}$	–	frequência de joelho
$\Delta T$	–	variação da temperatura
$w$	–	equação de estado da energia escura
$p$	–	pressão
$\rho$	–	densidade da matéria
$\omega$	–	modo de Fourier da frequência espectral
$\omega_0$	–	menor número de onda



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 DADOS E METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>3</b>
2.1 História térmica do Universo . . . . .	3
2.2 Oscilações acústicas de bárions . . . . .	5
2.3 Radiotelescópio BINGO . . . . .	7
2.4 Mapeamento de intensidade . . . . .	8
2.5 BAOs no contexto da Energia Escura . . . . .	10
<b>3 ANÁLISE E RESULTADOS</b> . . . . .	<b>13</b>
3.1 IM Pipeline . . . . .	13
3.2 O problema do Map Making . . . . .	14
3.3 Comportamento do ruído . . . . .	16
3.4 Modelagem do ruído $1/f$ . . . . .	17
3.5 Simulações do ruído com diferentes parâmetros . . . . .	18
3.6 Mapas produzidos . . . . .	22
<b>4 CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>29</b>



# 1 INTRODUÇÃO

O modelo cosmológico padrão baseia-se no princípio cosmológico, no qual o universo é homogêneo e isotrópico em largas escalas. As observações da distribuição de galáxias sugerem que essa hipótese é válida em escalas maiores ou iguais que 100 Mpcs e escalas angulares maiores ou iguais a 10 arcsecs. Para explicar as propriedades da matéria provenientes das variações de densidade e temperatura do Universo, convencionou-se uma linha temporal que descreve a sua evolução, dividida em épocas sob o critério do tipo de componente dominante: matéria bariônica e escura, radiação, neutrinos e energia escura.

Durante a época da nucleossíntese até os primeiros 380.000 anos após o Big Bang as temperaturas eram altas o suficiente para manter o meio ionizado, formando um plasma quente e denso e, assim, permitindo o equilíbrio térmico e a formação do fluido matéria-radiação. Como o Universo primitivo não era completamente homogêneo, eram formadas regiões de maior densidade da matéria escura fria. À medida que a matéria bariônica era atraída pelos poços de potencial gravitacional, esta também era aquecida e, no processo de radiação, emitida. Este efeito é o responsável pelas flutuações de densidade da matéria bariônica do Universo, conhecidas por oscilações acústicas de bárions (BAOs).

O fenômeno BAO fornece uma vela padrão, sendo uma referência de medida para o comprimento dado pela distância máxima que as ondas acústicas percorreram antes que o plasma esfriasse até o ponto em que se tornasse constituído principalmente por átomos neutros. O comprimento desta régua padrão é de 150 Mpc (490 milhões de anos-luz), medido por análises estatísticas da estrutura em grande escala. Esse sinal se manifesta como um pequeno excesso na contagem de pares, por exemplo de galáxias, ao se construir a função de correlação.

Segundo [Weinberg et al. \(2013\)](#), existem diferentes observáveis que sondam a energia escura: oscilações acústicas de bárions, lentes gravitacionais fracas e fortes, contagem de aglomerados e supernovas. As BAOs apresentam-se como uma ferramenta cosmológica poderosa em baixo redshift, pois são delimitadas por erros estatísticos e não sistemáticos. Uma forma de detectar BAOs em redshifts mais altos é pela distribuição do HI.

De acordo com [Wuensche \(2019\)](#), a distribuição do hidrogênio neutro (HI) é um dos traçadores da aglutinação da matéria e da formação de estruturas em larga escala (em inglês, large scale structure - LSS), além de ser possivelmente a única forma

de se observar o universo antes da reionização. Uma técnica da radioastronomia utilizada para medir a distribuição de HI é o mapeamento de intensidade (MI), sendo uma alternativa eficiente para levantamentos óticos. Ele possibilita medir as flutuações espaciais no fluxo integrado de muitas fontes não resolvidas em um tempo relativamente menor que outras técnicas.

O hidrogênio é o elemento mais abundante no universo, contudo o sinal em rádio detectável pelo mapeamento de intensidade esperado é muito fraco. Para uma maior amplitude do sinal são necessárias observações em maiores redshifts, o que aumenta também o número de contaminantes na linha de visada. Com o objetivo de realizar o mapeamento de intensidade do HI, foi criada uma pipeline que testa os ajustes paramétricos dos ruídos inerentes ao sistema e ao ambiente. Assim, foram realizadas simulações com os parâmetros construtivos da pipeline do projeto BINGO (em inglês, Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutron Gas Observations) que otimizem sua rotina operacional.

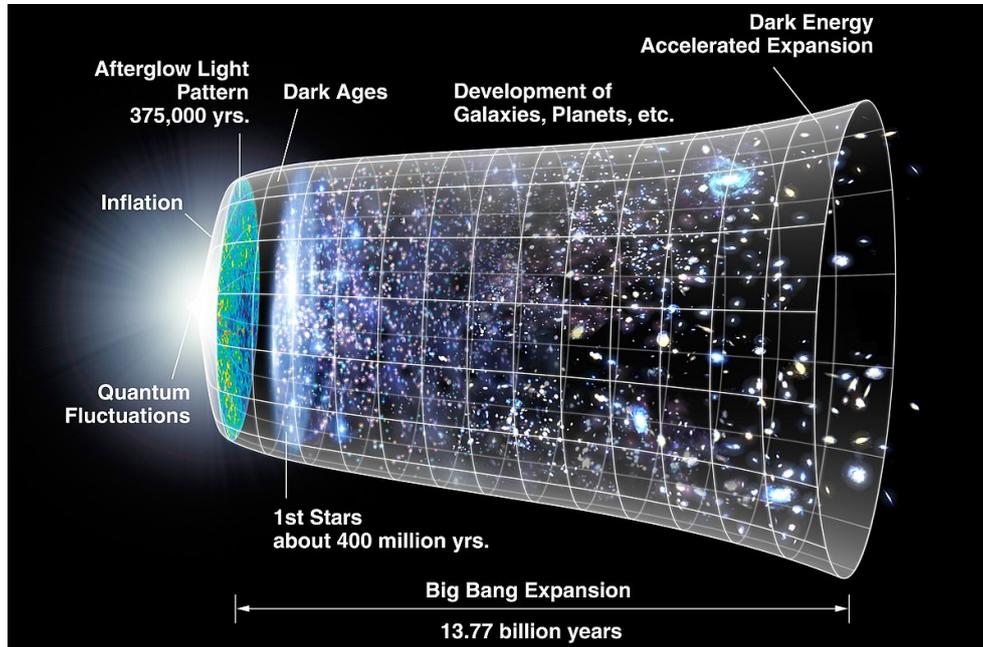
## 2 DADOS E METODOLOGIA

Este capítulo aborda a história térmica do Universo, em suas diferentes épocas e o processo de formação de BAO. Em seguida, apresentamos a descrição do radiotelescópio BINGO, juntamente com o conceito de mapeamento de intensidade.

### 2.1 História térmica do Universo

Segundo as leis da termodinâmica, a entropia e a desordem de um gás aumentam como resultado de uma expansão irreversível e adiabática. Se considerarmos o Universo como um sistema isolado que se expande adiabaticamente, é possível explicar o decréscimo de densidade e temperatura que alteram as propriedades da matéria. Portanto, baseado nos princípios mencionados é possível criar uma linha temporal evolutiva do Universo que descreve os principais momentos da história do Universo, incluindo observações da RCF, da estrutura em grande escala, o período da nucleossíntese e a expansão do Universo. Os principais momentos dessa linha do tempo serão descritos a seguir.

Figura 2.1 - Diagrama da evolução do Universo.



Fonte: (NASA; WMAP, 2012)

**Época inflacionária:** Partindo de um estado compacto e em equilíbrio termodinâmico, o Universo é preenchido por um plasma quente e denso de partículas que estão continuamente sendo criadas e aniquiladas. A energia do vácuo produz grandes quantidades de matéria e radiação através de flutuações quânticas do campo gerador da inflação, o inflaton. Como dito em [Dodelson \(2003\)](#), o período inflacionário foi uma solução para o Problema do Horizonte, onde é observado anisotropias na temperatura da RCF mesmo não ocorrendo um contato causal para ser estabelecido um equilíbrio térmico.

**Época da nucleossíntese:** A nucleossíntese ocorreu durante a época de domínio da radiação ( $t \leq 4 \times 10^{10}$  segundos,  $\sim 1200$ ) anos, quando fótons e outras espécies relativísticas encontravam-se em equilíbrio térmico. A alta densidade de elétrons livres causavam a diminuição do caminho livre médio através do espalhamento Thomson, enquanto as vastas quantidades de radiação, com temperaturas na ordem de  $\text{MeV}/k_b$  ( $\sim 1 \times 10^{10}$  K), permitiam que átomos ou núcleos produzidos fossem imediatamente destruídos por fótons de altas energias e permitiam o acoplamento entre a matéria e radiação. Devido a este acoplamento, a atração gravitacional entre regiões de maior densidade de matéria, dentro dos poços de potencial das flutuações de densidade primordiais tenderiam a comprimir a matéria, enquanto a pressão de radiação dos fótons resistiriam ao efeito e inibiriam o aumento de densidade.

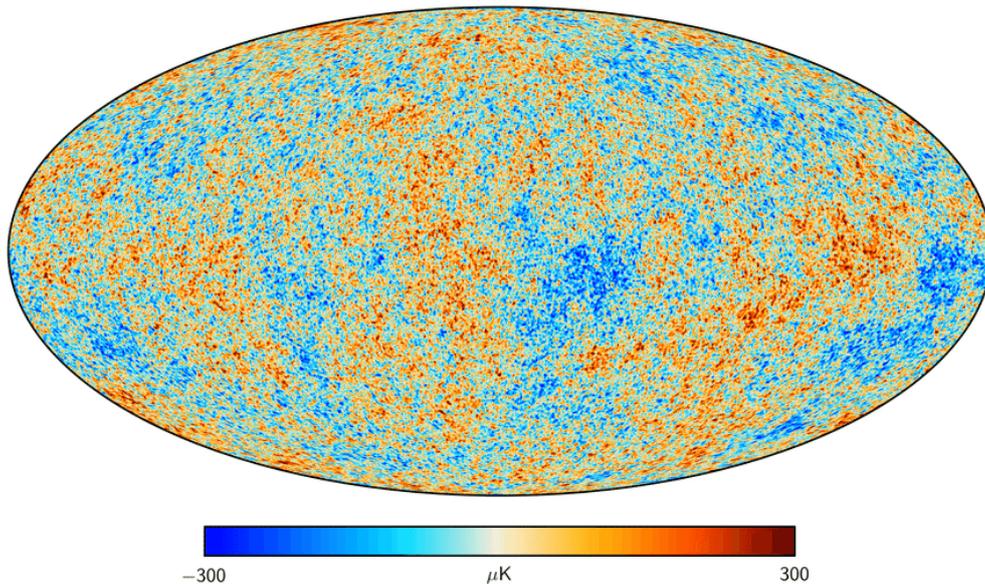
Considerando o tempo de decaimento do nêutron de  $t = 887,7 \pm 2,0$  segundos e a diminuição da temperatura do Universo ( $10^{10}$  K), tornou-se possível a formação de elementos leves, como Deutério, Hélio, Trítio e resquícios de Lítio, nos primeiros três minutos da história do Universo.

**Época da recombinação/desacoplamento:** Aproximadamente 378.000 anos após o Big Bang, as temperaturas baixam o suficiente ( $3000\text{K} \simeq 0,26\text{eV}$ ) para a formação de átomos neutros de hidrogênio e hélio, num período conhecido como recombinação. A partir desse momento, a densidade de elétrons livres começou a diminuir, até que o Universo tornou-se eletricamente neutro (sem elétrons livres), terminando o acoplamento entre matéria e radiação, o chamado desacoplamento. A partir de então, o Universo torna-se transparente e os fótons passam a viajar livremente, permitindo o crescimento de perturbações por instabilidade gravitacional. Esses fótons constituem a chamada Radiação Cósmica de Fundo, responsável por carregar uma grande quantidade de informações sobre os processos físicos do Universo primordial.

## 2.2 Oscilações acústicas de bárions

A Radiação Cósmica de Fundo fornece evidências, por meio de suas anisotropias, sobre a existência das chamadas oscilações acústicas de bárions (BAOs). Regiões que eram ligeiramente mais densas seriam mais quentes "Hot Spots" e regiões subdensas seriam mais frias "Cold Spots". As regiões mais densas (poços de potencial compostos de matéria escura, fótons e matéria bariônica antes do último espalhamento), atraíam a matéria bariônica, enquanto as interações fóton-matéria produziam uma pressão na direção oposta. Uma vez que a região superdensa atraiu matéria suficiente, as interações fóton-matéria tornam-se dominantes. Consecutivamente, a pressão de radiação afasta a matéria até que a força gravitacional volte a atuar, tornando-se dominante novamente. Este estado oscilatório cria regiões de compressão e rarefação, produzindo ondas acústicas que se propagam com velocidades relativísticas (da ordem de fração da velocidade da luz).

Figura 2.2 - Mapa da Radiação Cósmica de Fundo.



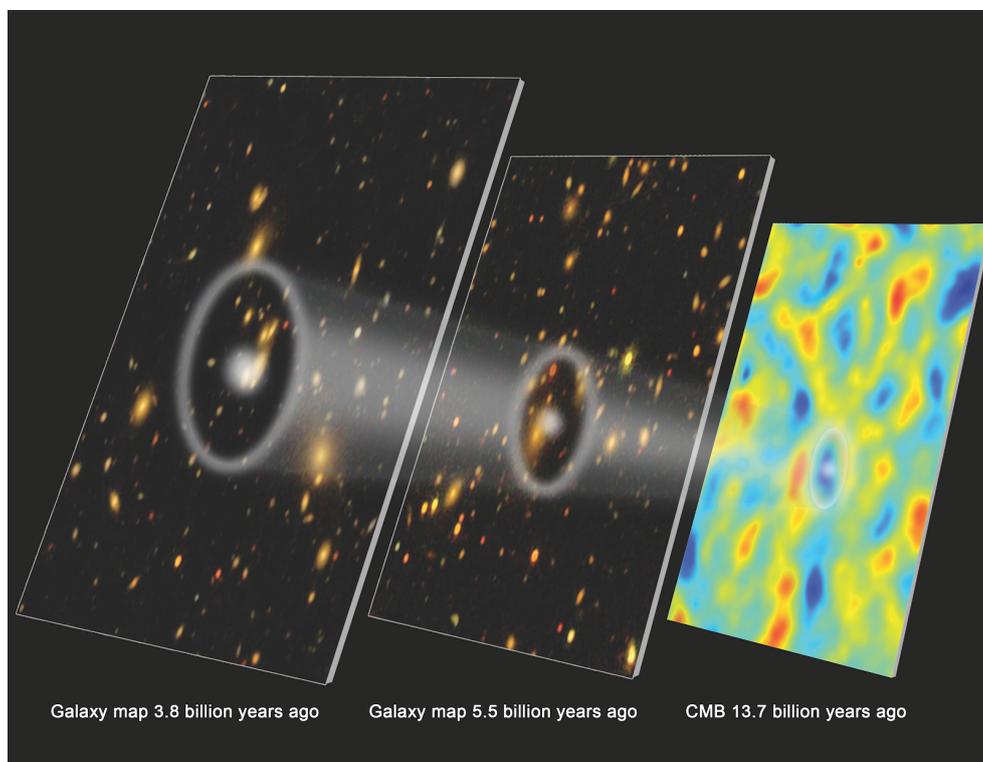
Mapa da Radiação Cósmica de Fundo obtida pelo satélite Planck. Regiões de máxima rarefação de bárions são "Cold Spots". Regiões de máxima compressão são "Hot Spots".

Fonte: (AGHANIM et al., 2020)

Após o desacoplamento entre a matéria e a radiação, a pressão dos fótons deixa de interagir com os bárions. A ausência de pressão impede que os bárions se propaguem,

criando uma escala característica que estará presente nos futuros agrupamentos de galáxias ("Horizonte sonoro"). Os bárions passam a se concentrar nos poços de potencial gravitacional formados pelas cascas esféricas geradas pela matéria escura fria e pela propagação das ondas acústicas após o desacoplamento. Em um cenário realista, o padrão de BAO não pode ser identificado visualmente em decorrência da enorme superposição de ondas acústicas, sendo necessário o uso de ferramentas estatísticas para sua identificação, como o espectro de potência angular e a função de correlação de dois pontos, para sua detecção.

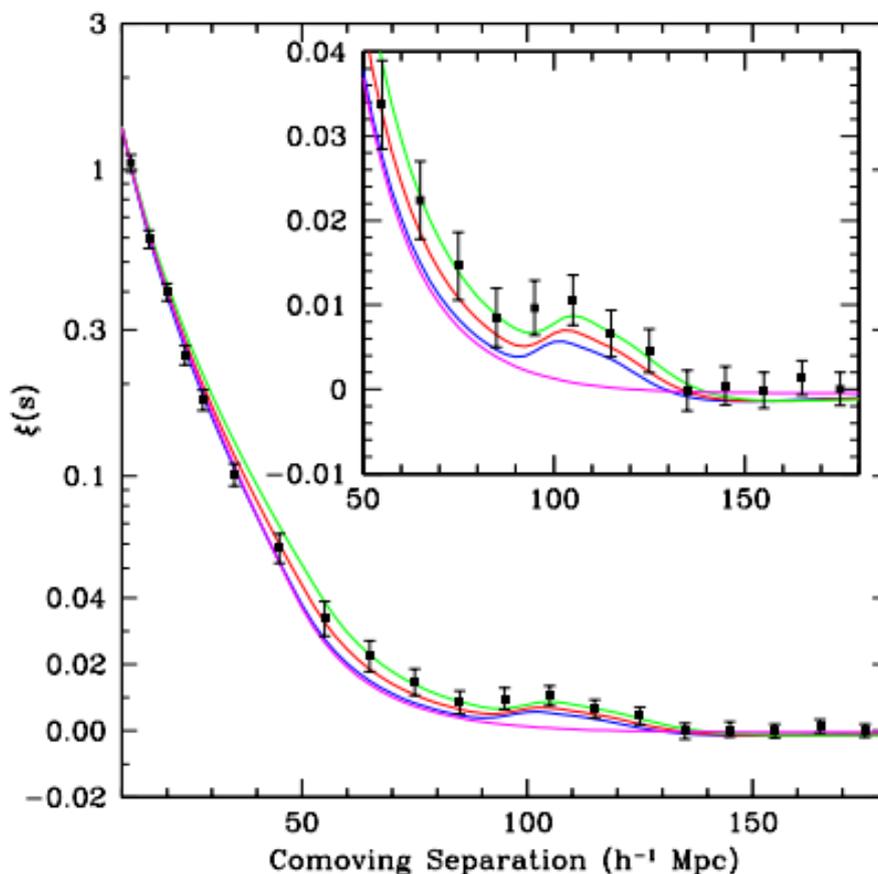
Figura 2.3 - Galáxias em alguns anéis formados pelas flutuações de densidade primordiais.



Fonte: (HUFF et al., 2012)

O sinal das BAOs é observado como um pequeno excesso (pico acústico) de contagens de pares, por exemplo, de galáxias. A função de correlação de dois pontos descreve que, ao se escolher uma galáxia, temos uma probabilidade um pouco maior de encontrar uma outra galáxia a uma distância de cerca de 150 Mpc, do que em qualquer outra distância aleatória entre dois pares.

Figura 2.4 - Gráfico da função de correlação de dois pontos



Função de correlação calculada a partir de um conjunto de 46.748 galáxias (pontos pretos). O pico acústico pode ser identificado em torno da escala de  $\sim 100h^{-1}\text{Mpc}$ . As curvas representam a expectativa teórica para diferentes quantidades de matéria,  $\Omega_m h^2 = 0,12$  (verde),  $0,13$  (vermelho) e  $0,14$  (azul). A curva rosa corresponde a um modelo com matéria escura fria que não inclui o pico acústico.

Fonte: (EISENSTEIN et al., 2005)

### 2.3 Radiotelescópio BINGO

BINGO é um telescópio de trânsito com dois refletores de cerca de 40 m de diâmetro, cujo principal objetivo científico é medir BAOs num intervalo de redshift  $0,127 \leq z \leq 0,449$  (correspondente a um intervalo de frequência de 980 a 1260 MHz), com uma resolução angular de  $\approx 40$  minutos de arco. O BINGO produzirá um mapa 3D da distribuição de HI através de uma técnica conhecida como mapeamento de intensidade em uma área do céu de cerca de 5300 graus quadrados. Ele apresenta um apontamento fixo, centrado em uma declinação de  $\delta = -15^\circ$  que utiliza a rotação

da Terra em suas observações, à medida que o céu se desloca pelo campo de visão do instrumento.

O intervalo de redshifts explorado corresponde a um intervalo de tempo entre 8,98 até 12,11 bilhões de anos. O sinal de rádio medido pelo BINGO será separado em 2048 canais de frequência via transformadas de Fourier e, posteriormente, será combinado em cerca de 80 bandas de redshift, permitindo uma tomografia de um grande volume do Universo. A medida de redshift apresentará uma precisão de  $10^{-4}$ , o que o torna um excelente instrumento para medidas de BAO e de distorções no espaço de redshift (em inglês, redshift space distortions - RSD).

O sistema óptico do BINGO é constituído por um espelho primário (paraboloide) e um secundário (hiperboloide), com 40 e 34 metros de diâmetro, respectivamente, e uma distância focal de 63 m. Eles iluminam uma superfície focal em que estão dispostas 28 cornetas corrugadas acopladas aos receptores que operam na temperatura ambiente. O receptor do instrumento é um radiômetro simples montado como um correlacionador.

De acordo com (WUENSCHÉ, 2019), seu correlacionador combina os sinais de cada modo de polarização circular com uma fonte externa de referência, para evitar variações de ganho que possam prejudicar sua capacidade de detectar o sinal do HI. A temperatura do sistema  $T_{sys} \approx 70$  K deve permitir uma sensibilidade de  $102 \mu K$  em um ano de observação.

## 2.4 Mapeamento de intensidade

O mapeamento de intensidade (MI) é uma técnica observacional da radioastronomia que permite a observação instantânea de grandes áreas do céu com baixa resolução angular (entre  $10'$  e 1 grau) Esta abordagem é eficiente para coletar a emissão integrada de linhas espectrais em galáxias, individualmente não resolvidas, e do meio intergaláctico difuso (IGM). De acordo com Kovetz et al. (2017), existe uma enorme variedade de linhas de emissão galáctica que cobrem desde a banda de rádio até o ultravioleta, de modo que, quando combinadas conseguem cobrir um grande intervalo de redshift. A principal linha espectral na faixa de rádio é a transição de 21 cm (correspondente a uma frequência de 1420 MHz) originada da transição hiperfina do hidrogênio neutro que permeava o meio intergaláctico após a recombinação e que atualmente pode ser encontrado dentro de nuvens moleculares escuras e frias no interior de galáxias.

Visto que o mapeamento do HI em grandes escalas oferece uma quebra de degenerescência das observações no óptico, é uma alternativa aos levantamentos na faixa do visível para detecção das BAOs. No entanto, são encontrados desafios no MI para a detecção do HI. Como mencionado em [Wuensche \(2019\)](#), temos um sinal de natureza não gaussiana que dificulta a separação das componentes, interferências na frequência de radio, limitações devido ao ruído do detector térmico e a contaminação por emissão de radiofontes extragalácticas e da CMB.

Figura 2.5 - Representação artística do telescópio BINGO.



O telescópio está sendo construído em Aguiar, Paraíba, nordeste do Brasil.

Fonte: ([WUENSCHÉ, 2019](#))

A aglutinação de matéria ao longo da história do Universo pode ser descrita por uma técnica conhecida como espectro de potência dos modos de oscilação da matéria, cuja descrição matemática é:

$$P_k(z) = \langle I(z) \rangle^2 b^2(z) P_m(k, z) + P_{shot}(z), \quad (2.1)$$

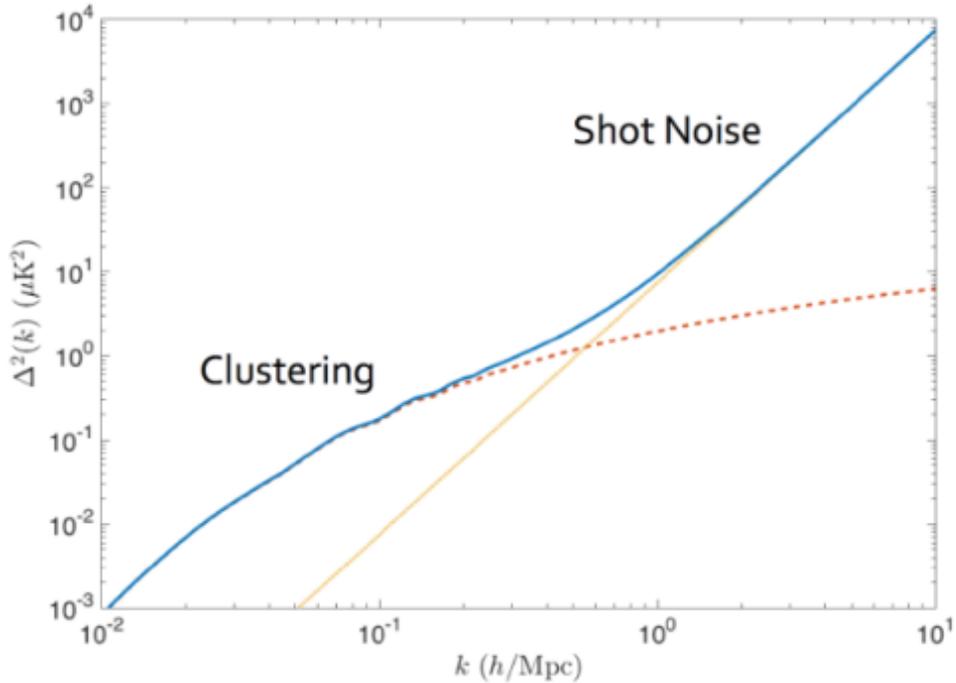
em que  $b$  refere-se ao bias na aglutinação da matéria emissora,  $P_m(k, z)$  é o espectro de potência da matéria e  $P_{shot}(z)$  é o espectro de potência do ruído, que é caracterizado por:

$$I(z) \propto \int_0^\infty L\Phi(L, z)dL, \quad (2.2)$$

$$P_{shot} \propto \int_0^\infty L^2\Phi(L, z)dL, \quad (2.3)$$

sendo  $\Phi(L, z) = dn(z)/DL$  a função de luminosidade da linha.

Figura 2.6 - Espectro de potência da matéria



Contribuições do sinal da aglutinação da matéria e do ruído referente à distribuição de Poisson dos objetos (shot noise) para o espectro de potência da matéria.

Fonte: (KOVETZ et al., 2017)

## 2.5 BAOs no contexto da Energia Escura

No modelo  $\Lambda$ CDM, a aceleração atual do Universo explica-se pela introdução de uma constante cosmológica, também interpretada como uma componente com equação de estado igual a  $w = p/\rho = -1$ . Entretanto, foram encontradas tensões em dados em baixo redshift comparados com resultados da sonda espacial Planck, iniciando uma busca por modelos alternativos que delimitem as propriedades da energia escura e

expliquem a expansão acelerada do Universo. Uma forma de se estudar a equação de estado  $w_z$  é parametrizar sua evolução, por exemplo, usando a forma:

$$w(z) = w_0 + w_a \frac{z}{1+z} \quad (2.4)$$

também conhecida por parametrização CPL, em que  $z$  o redshift,  $w_0$  e  $w_a$  os parâmetros livres. Dados do radiotelescópio BINGO poderiam restringir esse parâmetro com uma precisão equivalente à obtida com observações do satélite Planck (ABDALLA et al., 2022). Por outro lado, a combinação entre os dados do BINGO e do Planck permite estimar  $w_0$  com limites muito mais restritos, conforme mostrado na figura 2.7.

Figura 2.7 - Gráfico de contorno Energia Escura

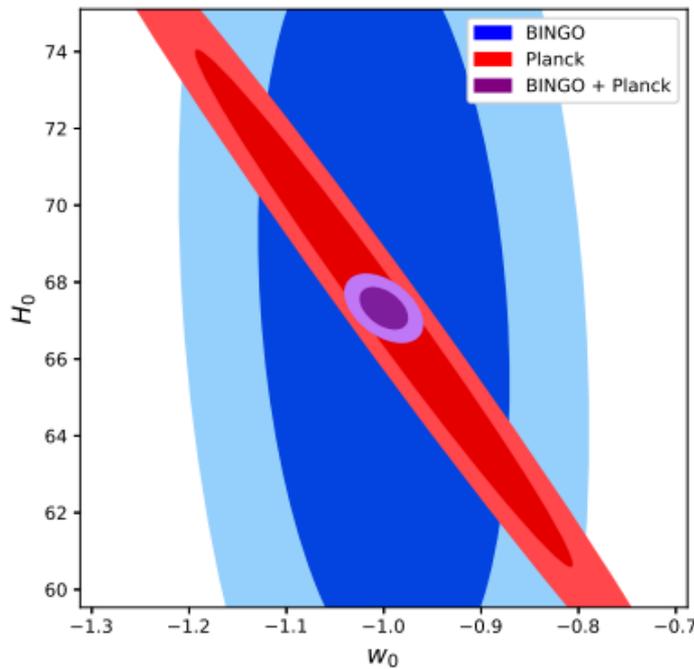


Gráfico de contorno mostrando o nível de confiança de 68% e 95% restrições na constante de Hubble e equação DE de parâmetros de estado usando BINGO, Planck e BINGO + Planck, para o modelo DE dinâmico.

Fonte: (ABDALLA et al., 2022)



### 3 ANÁLISE E RESULTADOS

Um radiotelescópio é, essencialmente, uma antena de rádio equipada com um receptor de sinais bastante sensível. Para um radioastrônomo, a radiação incidente pode ser tratada como a superposição de ondas eletromagnéticas clássicas e os sinais normalmente têm as características do ruído gaussiano. À medida que se move para comprimentos de onda mais curtos, o caráter discreto dos fótons torna-se cada vez mais dominante e o ruído aleatório, conhecido por Shot Noise. Visto que a ferramenta de criação de mapas (map-making) representa uma etapa intermediária crucial para a determinação de parâmetros cosmológicos — objetivo final do projeto BINGO, essencial para restringir as propriedades do setor escuro —, é fundamental que os mapas de intensidade sejam bem construídos, minimizando ao máximo a presença de ruído e permitindo uma análise precisa dos dados coletados pelo instrumento. Para avaliar a eficiência da ferramenta, foram gerados mapas simulados das observações do céu, incorporando ruídos como térmico e  $1/f$ , além de interferências de rádio-frequência e componentes astrofísicos como emissão síncrotron e free-free, os quais podem dificultar a obtenção de um mapa final de HI de alta qualidade.

#### 3.1 IM Pipeline

A simulação da observação de um instrumento de intensity mapping é realizada por meio de rotinas computacionais conhecidas como Intensity Mapping Pipeline (IM pipeline). O simulador utilizado neste trabalho foi desenvolvido por membros da colaboração BINGO na Universidade de Manchester. Este simulador recebe como entrada mapas de componentes astrofísicas (galácticas e extragalácticas) e cosmológicas (como o sinal de 21 cm do Hidrogênio Neutro e o fundo cósmico de micro-ondas - CMB), além de parâmetros de ruído (como ruído térmico e de baixa frequência), sistemas óticos, modelos de feixes, e operação do telescópio (banda de frequências, número de canais, taxa de amostragem, entre outros). Como saída, o pipeline gera séries temporais e mapas de intensidade, processados com o método Naive Map-Making (BATTYE et al., 2013);

Os mapas gerados pelo IM pipeline são compostos por emissões astrofísicas que contaminam o sinal de HI (Hidrogênio Neutro) na banda de frequência de interesse (980 - 1260 MHz no caso do BINGO), como ruídos instrumentais e emissões de síncrotron, bremsstrahlung, fontes pontuais, emissões em rádio e o CMB. A equação que descreve a temperatura do céu em função da posição e da frequência pode ser expressa como:

$$T_{sky}(f, x) = T_{RCFM}(f, x) + T_{gal}(f, x) + T_{ps}(f, x) + T_{HI}(f, x)$$

,

onde representa o sinal observado,  $T_{RCFM}$  é a temperatura do fundo cósmico de micro-ondas,  $T_{gal}$  é a temperatura da radiação galáctica difusa,  $T_{ps}$  é a temperatura de emissões de fontes pontuais extragalácticas e  $T_{HI}$  representa a emissão de HI. Como essas temperaturas variam em relação à posição angular e ao desvio para o vermelho (redshift), a análise das flutuações no brilho do céu permite a extração de informações cosmológicas (BATTYE et al., 2013).

Cada contaminante afeta a intensidade e a posição da emissão de maneira distinta. A radiação cósmica de fundo interfere nas medidas realizadas pelo BINGO na região de Rayleigh-Jeans, atuando como um fundo aproximadamente constante, o que facilita a sua separação do sinal de HI. Os principais contaminantes da radiação galáctica difusa são a emissão de sincrotron e bremsstrahlung, sendo a primeira a mais significativa na faixa de operação do BINGO (MERÍCIA, 2019).

### 3.2 O problema do Map Making

A IM pipeline cruza diferentes dados de entrada com o objetivo de simular observações do instrumento, incluindo informações de emissão das diversas fontes astrofísicas, ruídos observacionais e sistemáticos. Utilizando esses parâmetros de entrada, a ferramenta gera um conjunto de séries temporais que contém informações das medições realizadas pelo detector em cada instante de tempo, associando-as com a intensidade medida em cada pixel do detector.

É possível construir um vetor de dimensões, composto pelos dados da série temporal, que representa o número de medições realizadas pelo detector. Assim, considerando um modelo linear que relacione a intensidade no mapa e a série temporal, obtém-se:

$$\mathbf{d} = \mathbf{P}\mathbf{m} + \mathbf{n}$$

onde  $\mathbf{P}$  é a matriz de apontamento do instrumento, definida de acordo com as restrições específicas e estratégias de observação. Suas dimensões são  $N_d \times N_p$ , com  $N_p$  representando o índice de cada pixel do mapa reconstruído. Ou seja, a matriz indica as contribuições de cada pixel detectado em cada medida temporal e depende da organização estrutural do telescópio. O termo  $\mathbf{m}$  indica o vetor de intensidades

do sinal de HI obtido pelo instrumento. Tal vetor possui dimensões  $N_m \times 1$ , no qual  $N_m$  é o número de pixels do mapa. Enquanto  $\mathbf{n}$  é o vetor ruído, de dimensões  $N_d \times 1$ , que representa o ruído associado a cada medida.

Os elementos da matriz de apontamento estão relacionados às medições da série temporal pela expressão:

$$d_t = \sum_{p=1}^{N_p} P_{tp} m_p + n_t$$

Esta expressão representa a medida realizada pelo detector no tempo,  $d_t$  é a medida feita pelo detector em cada instante de tempo,  $P_{tp}$  representa cada elemento da matriz de apontamento,  $m_p$  é a intensidade do sinal de cada pixel, e  $n_t$  é o ruído presente em cada medida  $d_t$ . Portanto, os dados obtidos pela série temporal são definidos por uma matriz de apontamento que correlaciona a intensidade medida em cada pixel ao ruído. Essa abordagem possibilita o uso de map-making como uma técnica para obter a melhor estimativa da intensidade em cada pixel a partir das medições temporais, levando em consideração tanto o apontamento quanto o conhecimento sobre o ruído.

Um dos maiores desafios na construção de mapas de intensidade é determinar o método mais adequado para analisar as medições realizadas pelos pixels do detector. Na maioria das abordagens, utiliza-se o método Naive para gerar os mapas iniciais. Este método pode ser interpretado como um ponto de partida, baseando-se na média dos valores medidos e assumindo-a como a intensidade final. Como os dados são obtidos em diferentes instantes temporais, realiza-se uma contagem ponderada pela intensidade em cada pixel, somando as medições e dividindo pelo número total de medidas para cada instante .

Embora o método Naive seja simples, ele é eficiente para produzir resultados adequados e pode ser representado matematicamente como:

$$T(\alpha, \delta)_{\text{mapa}} = \sum_{t=0}^{t_{\text{final}}} \langle T_t(\alpha_t, \delta_t) \rangle$$

Neste trabalho, o método Naive foi o método adotado para a construção dos mapas de intensidade.

### 3.3 Comportamento do ruído

De acordo com Wuensche et al. (2022), a sensibilidade por pixel do experimento BINGO pode ser definida como

$$\sigma_t = \frac{T_{sys}}{\sqrt{t_{pix}\Delta\nu}}, \quad (3.1)$$

onde  $\Delta\nu$  é a largura do canal de frequência,  $T_{sys}$  é a temperatura de sistema e  $t_{pix}$  é o tempo de integração por pixel, aproximado por

$$t_{pix} = n_c t_{obs} \frac{\Omega_{pix}}{\Omega_{sur}}, \quad (3.2)$$

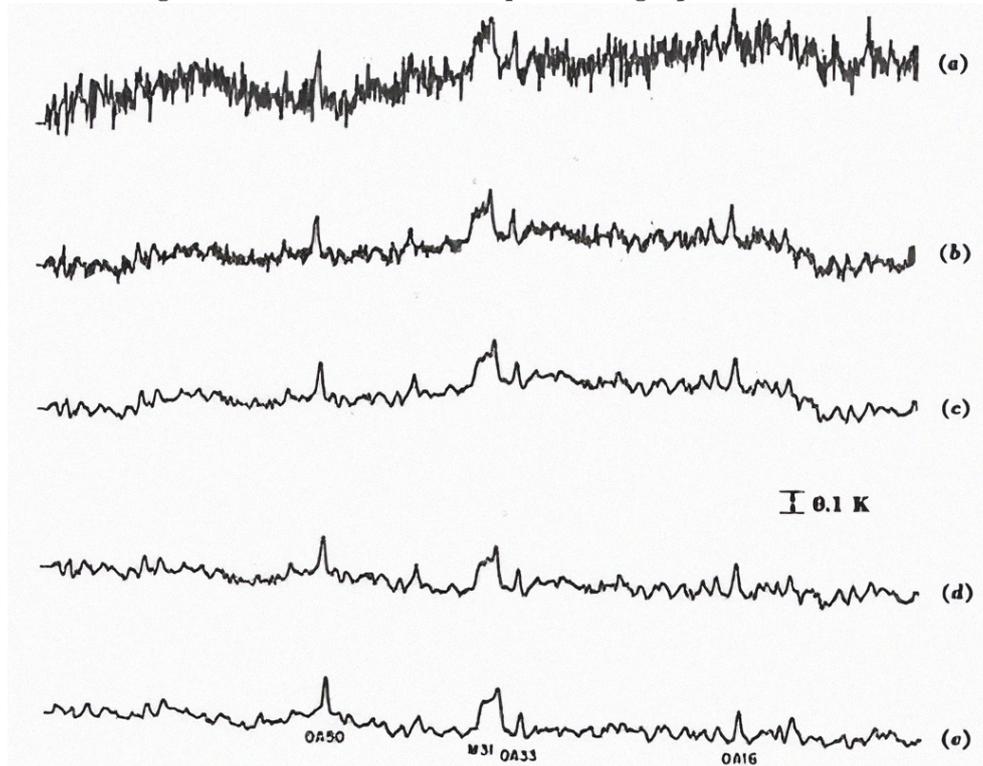
onde  $n_c$  é o número de cornetas,  $t_{obs}$  é o tempo de integração total,  $\Omega_{pix}$  é o ângulo sólido do feixe e  $\Omega_{sur}$  é o ângulo sólido da área observada do céu.

O ruído do instrumento é constituído por uma componente térmica e uma componente com característica 1/f. O ruído térmico ou branco é uma consequência do movimento aleatório dos elétrons nos componentes eletrônicos do instrumento, sua densidade espectral de potência ( $PSD(f)$ ) é constante em uma ampla faixa de frequências. E o ruído 1/f é produzido pelas flutuações inerentes aos ganhos dos amplificadores. Sua densidade espectral de potência é descrita:

$$PSD(f) = \frac{T_{sys}^2}{\nu_{samp}} \left[ 1 + \frac{f_{knee}}{f} \right]^\alpha \quad (3.3)$$

sendo  $T_{sys}$  a flutuação da temperatura mínima por pixel ou temperatura do sistema,  $\nu_{samp}$  é a frequência de amostragem,  $\alpha$  o índice espectral do ruído,  $f$  é o inverso do tempo de integração e  $f_{knee}$  é a frequência na qual a potência de ruído térmico e 1/f são iguais em uma dada faixa de frequências.

Figura 3.1 - Perfis com o tempo de integração aumentado.



Cinco perfis de deslocamento através do núcleo da Galáxia de Andrômeda realizados pelo radiotelescópio de 79 metros da Universidade de Ohio que ilustram condições operacionais limitadas em sensibilidade e em resolução. (a) resultado de 1 varredura. (b) média de 4 varreduras. (c) média de 4 varreduras com aumento de 3 vezes no tempo de integração em relação a (b). (d) mesmo que (c) com deslocamento de longo termo removido. (e) é a média de 11 varreduras com tempo de integração aumentado e deslocamento removido como em (d). Os perfis apresentam 2,5 horas em ascensão reta.

Fonte: (KRAUS, 1966)

### 3.4 Modelagem do ruído $1/f$

Segundo Harper et al. (2018), o modelo de ruído  $1/f$  que é utilizado nas simulações do MI assume que a fonte das flutuações  $1/f$  nas séries temporais (TOD) são originárias das flutuações correlacionadas no ganho dos amplificadores do receptor, de maneira que as flutuações do ruído  $1/f$  são variações pequenas em torno da temperatura do sistema. Podemos representar o ruído  $1/f$  no TOD por:

$$F(f) = \frac{1}{\Delta\nu} \left( \frac{f_k}{f} \right)^\alpha \quad (3.4)$$

sendo o espectro de potência temporal, assim como na Equação 3.3, mas sem a componente do ruído branco.

Não existe uma forma funcional encontrada na literatura que descreva adequadamente o comportamento e as várias dependências do ruído de frequência  $1/f$ ; assim Harper e colaboradores propuseram um modelo de lei de potência:

$$H(\omega) = \left( \frac{\omega_0}{\omega} \right)^{(1-\beta)/\beta} \quad (3.5)$$

onde  $\omega$  é o modo de Fourier da frequência espectral,  $\omega_0$  é a frequência de referência e  $0 \leq \beta \leq 1$  descreve a correlação da frequência:  $\beta = 1$  descreve um ruído  $1/f$  completamente não correlacionado com a frequência, enquanto  $\beta = 0$  representa uma correlação perfeita de  $1/f$  entre os canais.

### 3.5 Simulações do ruído com diferentes parâmetros

Com intuito de testar e otimizar os parâmetros construtivos, operacionais e o próprio processo de análise de dados, foram simuladas através da pipeline de mapeamento de intensidade utilizada para o BINGO: a série temporal do ruído térmico e seu respectivo histograma sob ajuste gaussiano. Considerando os seguintes parâmetros de entrada:

**Taxa de amostras:** 10 Hz (10 amostras/segundo);

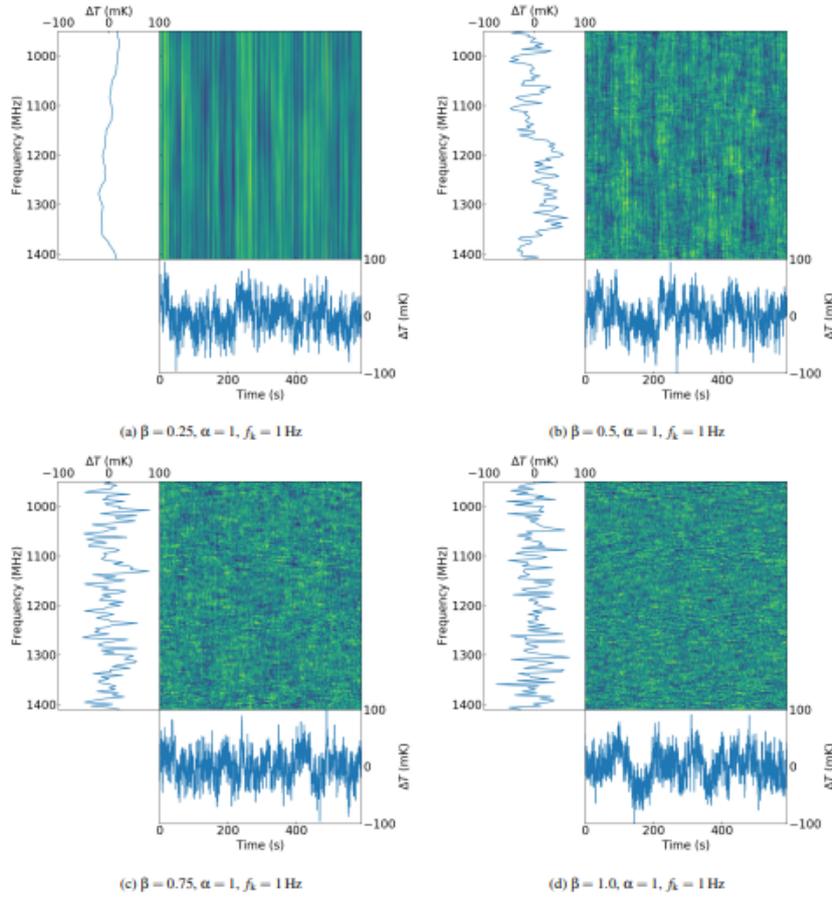
**Temperatura do sistema:** 70 K;

**Número de canais:** 30;

**Número de cornetas:** 28;

**Tempo de observação:** 7 dias =  $7 \times 24 \times 60 \times 60 = 604,800$  seconds

Figura 3.2 - Simulação do ruído 1/f para MI.



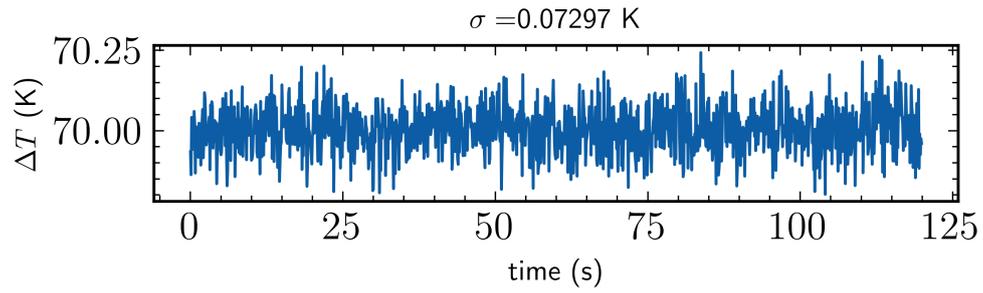
Gráficos da série temporal do ruído 1/f gerados usando a pipeline de simulação.

Fonte: (HARPER et al., 2018)

**Número de amostras por corneta = 6,048,000;**

A série temporal será um conjunto de medidas de temperatura para um canal  $\Delta\nu$  no intervalo de 960-1260 MHz em um dado intervalo de tempo, segundo uma coordenada celeste  $(\alpha, \delta)$  e instante de observação  $t_{obs}$ .

Figura 3.3 - Série temporal do ruído térmico.

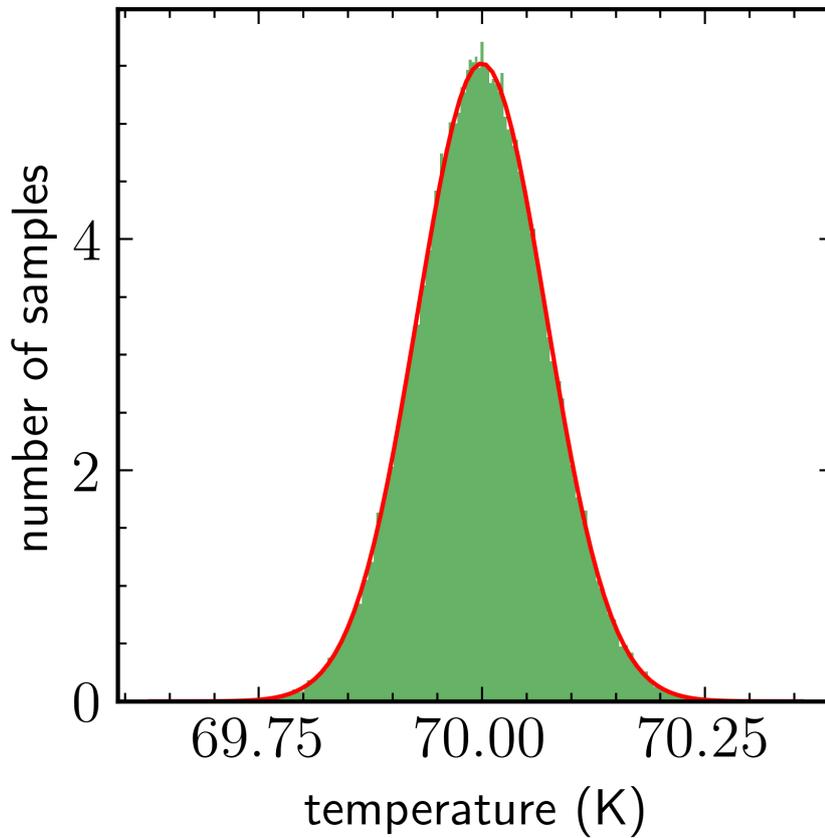


Fonte: Produção do autor.

É observado que a média gaussiana será a própria temperatura do sistema, 70 K. O desvio  $\sigma$  padrão foi de 0.07243, obtida pela Equação do radiômetro 3.1.

Figura 3.4 - Distribuição gaussiana do ruído térmico.

Fit results:  $\mu = 69.99978$ ,  $\sigma = 0.07225$



Fonte: Produção do autor.

Também foi realizada uma simulação do ruído térmico somado com  $1/f$  para diferentes temperaturas e  $f_{knees}$ . As entradas escolhidas foram:

**Taxa de amostras:** 10 Hz ( 10 amostras/segundo)

**Temperatura do sistema:** 50, 60 e 70 K

**Frequência de joelho:** 0.001, 0.01, 0.1 e 1 Hz

**Número de canais:** 30

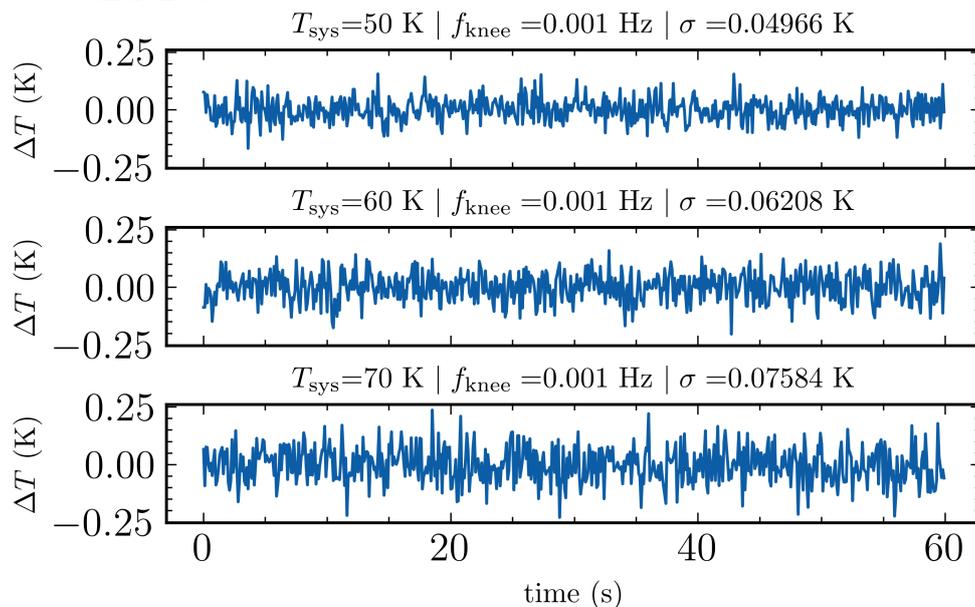
**Número de cornetas:** 28

**Tempo de observação:** 7 dias = 7 x 24 x 60 x 60 = 604,800 seconds

**Número de amostras por corneta** = 6,048,000

A temperatura do sistema altera o valor  $\sigma$  e, portanto, apresentando uma relação de proporcionalidade. Conforme se aumentou a temperatura, maior foi observado o ruído. Além disso, a frequência de joelho se manteve fixa para  $f_{knee} = 0.001 Hz$ .

Figura 3.5 - Série temporal do ruído térmico + ruído  $1/f$  para temperaturas de sistema diferentes.



Fonte: Produção do autor.

Quando fixamos a temperatura em 70 K e alteramos a  $f_{knee}$ , notamos que  $f_{knee} = 0.001Hz$  apresenta um menor ruído comparado com  $f_{knee} = 1Hz$ . Assim, é interessante para o radiotelescópio BINGO que sejam obtidas frequências de joelho mais baixas para uma menor contaminação do sinal observado pelo ruído  $1/f$ . É importante ressaltar que somente o ruído térmico seria menor se aumentarmos o tempo de observação, sendo interessante realizar novas simulações em maiores intervalos de tempo.

### 3.6 Mapas produzidos

Os dados gerados consistem em mapas armazenados no formato HDF (Hierarchical Data Format), um padrão amplamente utilizado para a organização e armazenamento de grandes volumes de dados numéricos. Cada simulação, parametrizada com um conjunto específico de configurações de instrumento e tempo de observação, produz um arquivo nesse formato, contendo mapas, pesos e contagens por pixel para cada canal de frequência.

Para viabilizar a visualização dos mapas, foi necessário extrair os dados dos arquivos HDF e convertê-los para o formato FITS (Flexible Image Transport System). O formato FITS é amplamente usado em astronomia, adequado para o armazenamento, transmissão e processamento de dados em diversas dimensões, como imagens bidimensionais e tabelas.

Nas duas primeiras sequências, foram produzidos os mapas do ruído térmico e do HI observado. É escolhido um canal intermediário do intervalo de frequências. Considerando as características observacionais do radiotelescópio:

**Temperatura do sistema:** 50, 60 e 70 K

**Frequência de joelho:** 0.001, 0.01, 0.1

**Canal:** 14

**Número de cornetas:** 28

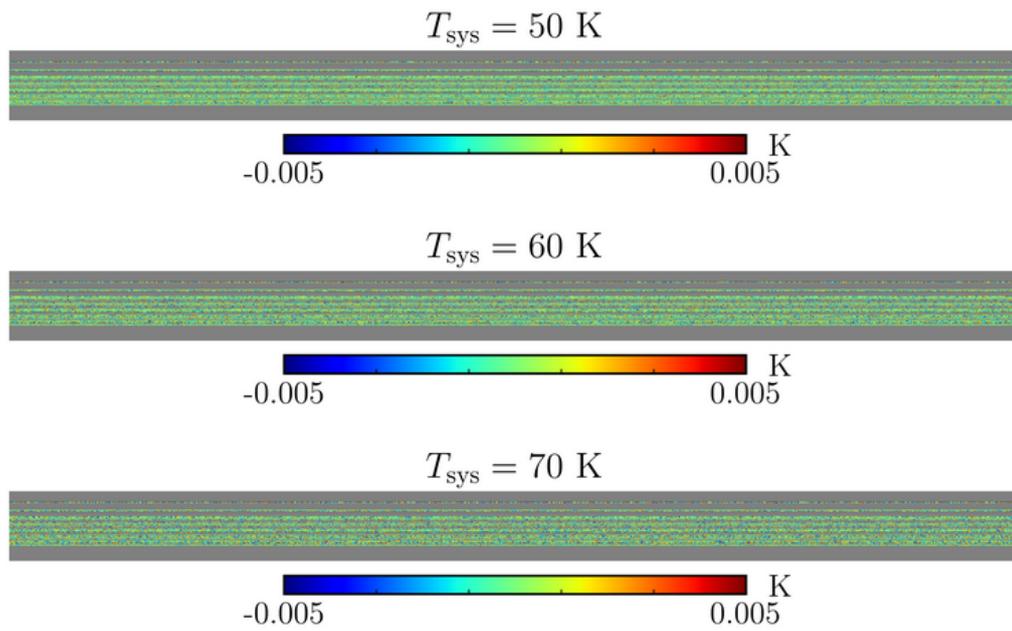
**Tempo de observação:**  $5 \times 24 \times 3600 = 43200$

**Sampling size:** 1 segundos

Block size: 7200 segundos

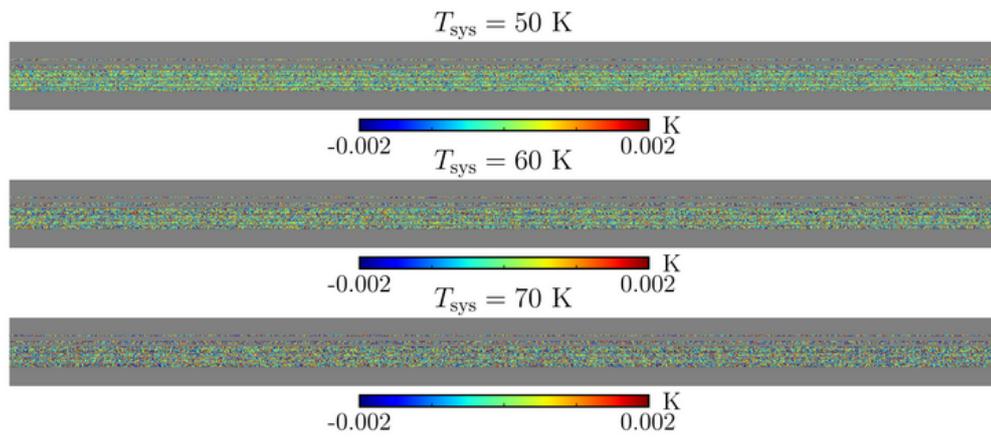
Número de arquivos = 60

Figura 3.6 - Mapa do ruído térmico.  
channel 14 (1110.7 - 1120.0 MHz)



Fonte: Produção do autor.

Figura 3.7 - Mapa do HI observado + ruído térmico.  
Observed HI + thermal noise maps - channel 14 (1110.7 - 1120.0 MHz)



Fonte: Produção do autor.

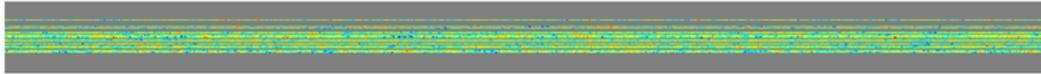
Nos mapas do HI observado + ruído térmico + ruído 1/f e do do HI observado + ruído térmico + ruído 1/f + RFI + síncrotron + free-free foram mantidas as mesmas configurações, exceto o ruído 1/f (0.001 - 0.100 Hz) escolhido.

Figura 3.8 - Mapa do HI observado + ruído térmico + ruído 1/f.

Channel 14 (1110.7 MHz - 1120.0 MHz)

$f_{\text{knee}}=0.001 \text{ Hz} \mid \beta=0.00 \mid \text{no filter}$

Observation

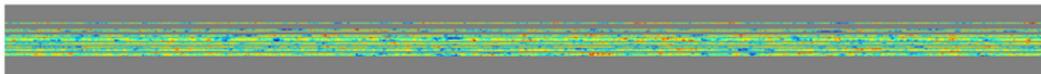


 K  
-0.00397 0.00391

Channel 14 (1110.7 MHz - 1120.0 MHz)

$f_{\text{knee}}=0.100 \text{ Hz} \mid \beta=0.00 \mid \text{no filter}$

Observation



 K  
-0.0238 0.024

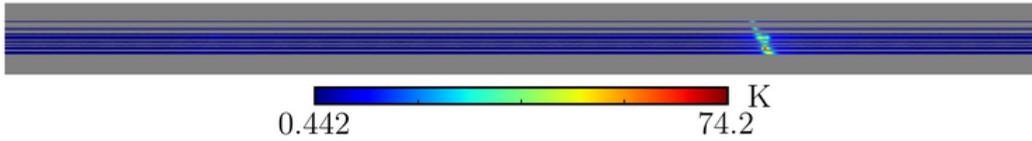
Fonte: Produção do autor.

Figura 3.9 - Mapa do HI observado + ruído térmico + ruído 1/f + RFI + síncrotron + free-free.

Channel 14 (1110.7 MHz - 1120.0 MHz)

$f_{\text{knee}}=0.001$  Hz |  $\beta=0.25$  | no filter

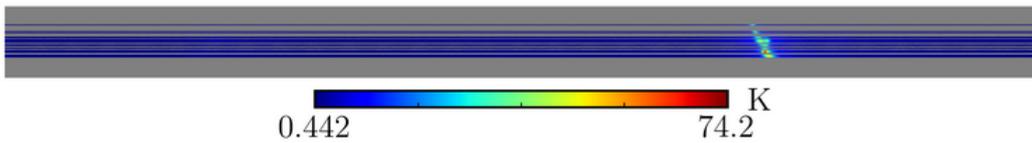
Observation



Channel 14 (1110.7 MHz - 1120.0 MHz)

$f_{\text{knee}}=0.001$  Hz |  $\beta=0.25$  | no filter

Observation



Fonte: Produção do autor.

## 4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado o estudo de conceitos relevantes para compreensão das BAOs, da técnica do MI e dos tipos de ruídos relevantes para a compreensão dos dados do radiotelescópio BINGO. Apresentamos uma breve discussão sobre os ruídos presentes nos sistemas receptores. As simulações foram realizadas com a pipeline que será utilizada na análise dos dados do BINGO; essa pipeline é um conjunto de rotinas computacionais que simulam sua operação, e que permite a escolha de diversos parâmetros de entrada, tais como a temperatura do sistema, tempo de observação, número de canais, de amostras e de cornetas.

Foram observadas as relações do ruído  $1/f$  e térmico para diferentes temperaturas e  $f_{knees}$ , onde o sinal foi superior para temperaturas e  $f_{knees}$  mais elevadas. O ruído térmico apresentou um comportamento gaussiano, com média em torno da temperatura do sistema. Ademais, os mapas produzidos visam testar o método Naive para seu possível aprimoramento futuro e, assim, testá-los em próximas etapas para a separação de componentes. Tal método de separação, remove os ruídos observacionais e sistemáticos, recuperando o sinal do HI. Uma alternativa ao método Naive consiste em utilizar o recurso de maximum likelihood ou método de máxima verossimilhança, no qual leva-se em consideração a contribuição dos pixels adjacentes a medida de cada pixel.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, E.; FERREIRA, E. G. M.; LANDIM, R. G.; COSTA, A. A.; FORNAZIER, K. S. F.; ABDALLA, F. B.; BAROSI, L.; BRITO, F. A.; QUEIROZ, A. R.; VILLELA, T.; WANG, B.; WUENSCHÉ, C. A.; MARINS, A.; NOVAES, C. P.; LICCARDO, V.; SHAN, C.; ZHANG, J.; ZHANG, Z.; ZHU, Z.; BROWNE, I.; DELABROUILLE, J.; SANTOS, L.; SANTOS, M. V. dos; XU, H.; ANTON, S.; BATTYE, R.; CHEN, T.; DICKINSON, C.; MA, Y.-Z.; MAFFEI, B.; MERICIA, E. J. de; MOTTA, P.; OTOBONE, C. H. N.; PEEL, M. W.; ROYCHOWDHURY, S.; REMAZEILLES, M.; RIBEIRO, R. M.; SANG, Y.; SANTOS, J. R. L.; SANTOS, J. F. R. dos; SILVA, G. B.; VIEIRA, F.; VIEIRA, J.; XIAO, L.; ZHANG, X.; ZHU, Y. The BINGO project. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 664, p. A14, aug 2022. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1051%2F0004-6361%2F202140883>>>. 11

AGHANIM and N.; AKRAMI, Y.; ARROJA, F.; ASHDOWN, M.; AUMONT, J.; BACCIGALUPI, C.; BALLARDINI, M.; BANDAY, A. J.; BARREIRO, R. B.; BARTOLO, N.; BASAK, S.; BATTYE, R.; BENABED, K.; BERNARD, J.-P.; BERSANELLI, M.; BIELEWICZ, P.; BOCK, J. J.; BOND, J. R.; BORRILL, J.; BOUCHET, F. R.; BOULANGER, F.; BUCHER, M.; BURIGANA, C.; BUTLER, R. C.; CALABRESE, E.; CARDOSO, J.-F.; CARRON, J.; CASAPONSA, B.; CHALLINOR, A.; CHIANG, H. C.; COLOMBO, L. P. L.; COMBET, C.; CONTRERAS, D.; CRILL, B. P.; CUTTAIA, F.; BERNARDIS, P. de; ZOTTI, G. de; DELABROUILLE, J.; DELOUIS, J.-M.; DÉSSERT, F.-X.; VALENTINO, E. D.; DICKINSON, C.; DIEGO, J. M.; DONZELLI, S.; DORÉ, O.; DOUSPIS, M.; DUCOUT, A.; DUPAC, X.; EFSTATHIOU, G.; ELSNER, F.; ENSSLIN, T. A.; ERIKSEN, H. K.; FALGARONE, E.; FANTAYE, Y.; FERGUSSON, J.; FERNANDEZ-COBOS, R.; FINELLI, F.; FORASTIERI, F.; FRAILIS, M.; FRANCESCHI, E.; FROLOV, A.; GALEOTTA, S.; GALLI, S.; GANGA, K.; GÉNOVA-SANTOS, R. T.; GERBINO, M.; GHOSH, T.; GONZÁLEZ-NUEVO, J.; GÓRSKI, K. M.; GRATTON, S.; GRUPPUSO, A.; GUDMUNDSSON, J. E.; HAMANN, J.; HANDLEY, W.; HANSEN, F. K.; HELOU, G.; HERRANZ, D.; HILDEBRANDT, S. R.; HIVON, E.; HUANG, Z.; JAFFE, A. H.; JONES, W. C.; KARAKCI, A.; KEIHÄNEN, E.; KESKITALO, R.; KIIVERI, K.; KIM, J.; KISNER, T. S.; KNOX, L.; KRACHMALNICOFF, N.; KUNZ, M.; KURKI-SUONIO, H.; LAGACHE, G.; LAMARRE, J.-M.; LANGER, M.; LASENBY, A.; LATTANZI, M.; LAWRENCE, C. R.; JEUNE, M. L.; LEAHY, J. P.; LESGOURGUES, J.; LEVRIER, F.; LEWIS, A.; LIGUORI, M.; LILJE, P. B.; LILLEY, M.; LINDHOLM, V.; LÓPEZ-CANIEGO, M.; LUBIN, P. M.; MA, Y.-Z.; MACÍAS-PÉREZ, J. F.; MAGGIO, G.; MAINO, D.; MANDOLESI, N.; MANGILLI, A.; MARCOS-CABALLERO, A.; MARIS, M.; MARTIN, P. G.; MARTINELLI, M.; MARTÍNEZ-GONZÁLEZ, E.; MATARRESE, S.; MAURI, N.; MCEWEN, J. D.; MEERBURG, P. D.; MEINHOLD, P. R.; MELCHIORRI, A.; MENNELLA, A.; MIGLIACCIO, M.; MILLEA, M.; MITRA, S.; MIVILLE-DESCHÊNES, M.-A.; MOLINARI, D.; MONETI, A.; MONTIER, L.; MORGANTE, G.; MOSS, A.; MOTTET, S.; MÜNCHMEYER, M.; NATOLI, P.;

NØRGAARD-NIELSEN, H. U.; OXBORROW, C. A.; PAGANO, L.; PAOLETTI, D.; PARTRIDGE, B.; PATANCHON, G.; PEARSON, T. J.; PEEL, M.; PEIRIS, H. V.; PERROTTA, F.; PETTORINO, V.; PIACENTINI, F.; POLASTRI, L.; POLENTA, G.; PUGET, J.-L.; RACHEN, J. P.; REINECKE, M.; REMAZEILLES, M.; RENAULT, C.; RENZI, A.; ROCHA, G.; ROSSET, C.; ROUDIER, G.; RUBIÑO-MARTÍN, J. A.; RUIZ-GRANADOS, B.; SALVATI, L.; SANDRI, M.; SAVELAINEN, M.; SCOTT, D.; SHELLARD, E. P. S.; SHIRAISHI, M.; SIRIGNANO, C.; SIRRI, G.; SPENCER, L. D.; SUNYAEV, R.; SUUR-USKI, A.-S.; TAUBER, J. A.; TAVAGNACCO, D.; TENTI, M.; TERENCEZI, L.; TOFFOLATTI, L.; TOMASI, M.; TROMBETTI, T.; VALIVIITA, J.; TENT, B. V.; VIBERT, L.; VIELVA, P.; VILLA, F.; VITTORIO, N.; WANDELT, B. D.; WEHUS, I. K.; WHITE, M.; WHITE, S. D. M.; ZACCHEI, A.; ZONCA, A. *iplanck/i2018 results*. **Astronomy & Astrophysics**, EDP Sciences, v. 641, p. A1, sep 2020. Disponível em:

<<<https://doi.org/10.1051%2F0004-6361%2F201833880>>>. 5

BATTYE, R. A.; BROWNE, I. W. A.; DICKINSON, C.; HERON, G.; MAFFEI, B.; POURTSIDOU, A. Hi intensity mapping: a single dish approach. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Oxford University Press (OUP), v. 434, n. 2, p. 1239–1256, jul. 2013. ISSN 1365-2966. Disponível em:

<<<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt1082>>>. 13, 14

DODELSON, S. Book. **Modern Cosmology**. [S.l.]: Academic Press, Elsevier Science, 2003. 4

EISENSTEIN, D. J.; ZEHAVI, I.; HOGG, D. W.; SCOCCIMARRO, R.; BLANTON, M. R.; NICHOL, R. C.; SCRANTON, R.; SEO, H.-J.; TEGMARK, M.; ZHENG, Z.; ANDERSON, S. F.; ANNIS, J.; BAHCALL, N.; BRINKMANN, J.; BURLES, S.; CASTANDER, F. J.; CONNOLLY, A.; CSABAI, I.; DOI, M.; FUKUGITA, M.; FRIEMAN, J. A.; GLAZEBROOK, K.; GUNN, J. E.; HENDRY, J. S.; HENNESSY, G.; IVEZIĆ, Z.; KENT, S.; KNAPP, G. R.; LIN, H.; LOH, Y.-S.; LUPTON, R. H.; MARGON, B.; MCKAY, T. A.; MEIKSIN, A.; MUNN, J. A.; POPE, A.; RICHMOND, M. W.; SCHLEGEL, D.; SCHNEIDER, D. P.; SHIMASAKU, K.; STOUGHTON, C.; STRAUSS, M. A.; SUBBARAO, M.; SZALAY, A. S.; SZAPUDI, I.; TUCKER, D. L.; YANNY, B.; YORK, D. G.

Detection of the baryon acoustic peak in the large-scale correlation function of SDSS luminous red galaxies. **The Astrophysical Journal**, American Astronomical Society, v. 633, n. 2, p. 560–574, nov 2005. Disponível em:

<<<https://doi.org/10.1086%2F466512>>>. 7

HARPER, S. E.; DICKINSON, C.; BATTYE, R. A.; ROYCHOWDHURY, S.; BROWNE, I. W. A.; MA, Y.-Z.; OLIVARI, L. C.; CHEN, T. Impact of simulated 1/f noise for HI intensity mapping experiments. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 478, n. 2, p. 2416–2437, 05 2018. ISSN 0035-8711.

Disponível em: <<<https://doi.org/10.1093/mnras/sty1238>>>. 17, 19

HUFF, E. M.; TEAM, S.-I.; TEAM the S. P. T.; ROSTOMIAN, Z. **When Dark Energy Turned On**. 2012. Disponível em:

<<<https://www.sdss3.org/press/20120330.bspect.php>>>. Acesso em: 14 aug. 2023.  
6

KOVETZ, E. D.; VIERO, M. P.; LIDZ, A.; NEWBURGH, L.; RAHMAN, M.; SWITZER, E.; KAMIONKOWSKI, M.; AGUIRRE, J.; ALVAREZ, M.; BOCK, J.; BOND, J. R.; BOWER, G.; BRADFORD, C. M.; BREYSSE, P. C.; BULL, P.; CHANG, T.-C.; CHENG, Y.-T.; CHUNG, D.; CLEARY, K.; CORRAY, A.; CRITES, A.; CROFT, R.; DORé, O.; EASTWOOD, M.; FERRARA, A.; FONSECA, J.; JACOBS, D.; KEATING, G. K.; LAGACHE, G.; LAKHLANI, G.; LIU, A.; MOODLEY, K.; MURRAY, N.; PÉNNIN, A.; POPPING, G.; PULLEN, A.; REICHERS, D.; SAITO, S.; SALIWANCHIK, B.; SANTOS, M.; SOMERVILLE, R.; STACEY, G.; STEIN, G.; VILLAESCUSA-NAVARRO, F.; VISBAL, E.; WELTMAN, A.; WOLZ, L.; ZEMCOV, M. **Line-Intensity Mapping: 2017 Status Report**. 2017. 8, 10

KRAUS, J. **Radio Astronomy**. McGraw-Hill, 1966. ISBN 9780070353923. Disponível em: <<[https://books.google.com.br/books?id=\\_u9QAAAAMAAJ](https://books.google.com.br/books?id=_u9QAAAAMAAJ)>>. 17

MERÍCIA, E. J. D. **Simulações do processo de separação de componentes e recuperação do sinal de 21 cm do hi aplicadas ao radiotelescópio bingo**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. 14

NASA; WMAP, s. t. **Timeline of the Universe**. 2012. Disponível em: <<<https://map.gsfc.nasa.gov/media/060915/index.html>>>. Acesso em: 14 aug. 2023. 3

WEINBERG, D. H.; MORTONSON, M. J.; EISENSTEIN, D. J.; HIRATA, C.; RIESS, A. G.; ROZO, E. Observational probes of cosmic acceleration. **Physics Reports**, Elsevier BV, v. 530, n. 2, p. 87–255, sep 2013. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1016%2Fj.physrep.2013.05.001>>>. 1

WUENSCHÉ, C. The BINGO telescope: a new instrument exploring the new 21 cm cosmology window. **Journal of Physics: Conference Series**, IOP Publishing, v. 1269, n. 1, p. 012002, jul 2019. Disponível em: <<<https://doi.org/10.1088%2F1742-6596%2F1269%2F1%2F012002>>>. 1, 8, 9

Wuensche, C. A.; Villela, T.; Abdalla, E.; Liccardo, V.; Vieira, F.; Browne, I.; Peel, M. W.; Radcliffe, C.; Abdalla, F. B.; Marins, A.; Barosi, L.; Brito, F. A.; Queiroz, A. R.; Wang, B.; Costa, A. A.; Ferreira, E. G. M.; Fornazier, K. S. F.; Landim, R. G.; Novaes, C. P.; Santos, L.; dos Santos, M. V.; Zhang, J.; Chen, T.; Delabrouille, J.; Dickinson, C.; de Gasperis, G.; Gurjão, E. C.; Harper, S.; Ma, Y.-Z.; Machado, T.; Maffei, B.; de Mericia, E. J.; Monstein, C.; Motta, P.; Otobone, C. H. N.; Reitano, L. A.; Remazeilles, M.; Roychowdhury, S.; Santos, J. R. L.; Serres, A. J. R.; Souza, A. P.; Strauss, C.; Vieira, J.; Xu, H. The BINGO project. II. Instrument description. , v. 664, p. A15, ago. 2022. 16



## **PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE**

### **Teses e Dissertações (TDI)**

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

### **Manuais Técnicos (MAN)**

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

### **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.

### **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.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

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

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

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

### **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.

### **Pré-publicações (PRE)**

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