

CADERNOS DE ASTRONOMIA

NÚCLEO DE ASTROFÍSICA E COSMOLOGIA DA UFES

ANAIS DA 2ª EDIÇÃO DO EVENTO

AS ASTROCIENTISTAS

ENCONTRO BRASILEIRO DE MENINAS E MULHERES DA
ASTROFÍSICA, COSMOLOGIA E GRAVITAÇÃO



CORPO EDITORIAL

Prof. Dr. Felipe Tovar Falciano (CBPF)
ftovar@cbpf.br

Prof. Dr. Hermano Velten (UFOP)
hermano.velten@ufop.edu.br

Prof. Dr. Júlio C. Fabris (Ufes)
julio.fabris@cosmo.ufes.org

Prof. Dr. Júnior Diniz Toniato (Ufes)
junior.toniato@ufes.br

CONSELHO CIENTÍFICO

Prof. Dr. Adriano Mesquita Oliveira (Ifes)
adriano.oliveira@ifes.edu.br

Prof. Dr. José A. F. Pacheco (OCA, França)
pacheco@oca.eu

Prof. Dr. Sergio Mascarello Bisch (Ufes)
sergiobisch@gmail.com

EDITORES CONVIDADOS

Carla Rodrigues Almeida (UFBA)
carlarodrigues@ufba.br

Emmanuel Frion (UWO, Canadá)
efrion@uwo.ca

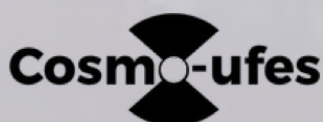
Paola C. M. Delgado (UJ, Polônia)
paola.moreira.delgado@doctoral.uj.edu.pl

Tays Miranda (UFF)
taysmiranda@id.uff.br

ENDEREÇO

Núcleo de Astrofísica e Cosmologia.
Universidade Federal do Espírito Santo.
Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras.
Vitória - ES. CEP 29075-010

E-mail: cadernos@cosmo-ufes.org



SOBRE A REVISTA

A revista *Cadernos de Astronomia* é uma publicação semestral do Núcleo Cosmo-Ufes da Universidade Federal do Espírito Santo e que conta também com recursos humanos do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e da Universidade Federal de Ouro Preto (vide o Corpo Editorial).

Propõe-se a publicar artigos destinados à divulgação científica, história da ciência, ensino e pesquisa em astronomia e áreas correlatas. O objetivo é tornar acessível a um amplo público, que inclui estudantes secundários, graduandos e simpatizantes da área, o conhecimento científico relacionado à astronomia, cosmologia e gravitação.

Possuindo acesso totalmente gratuito, cada número dedica uma seção inteira a um tema específico, onde especialistas nacionais e internacionais discutem em detalhes aspectos qualitativos e quantitativos do tópico em questão.

SUBMISSÕES

A revista *Cadernos de Astronomia* aceita artigos inéditos versando sobre temas de divulgação científica, história da ciência, ensino e pesquisa nas áreas de astronomia, cosmologia e disciplinas afins. Além de artigos que busquem traduzir para uma linguagem simples tópicos avançados de ciências, também se aceita a submissão de textos que introduzam aspectos técnicos de temas variados visando estudantes de graduação e início de pós-graduação. Espera-se assim contribuir para a ampliação de uma bibliografia qualificada para a formação de jovens cientistas.

Para mais informações acesse:

<https://periodicos.ufes.br/astronomia/about/submissions>

ARTE DE FUNDO DA CAPA E CONTRACAPA

Créditos: NASA's Goddard Space Flight Center

Carta ao Leitor

É com imenso prazer que apresentamos, nesta edição especial dos *Cadernos de Astronomia*, os Anais da Segunda Edição do evento *As Astrocientistas: Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação*. Este evento é uma celebração ao Dia Internacional das Mulheres e Meninas na Ciência, comemorado em 11 de fevereiro, que almeja dar visibilidade às pesquisadoras brasileiras nas áreas de Astrofísica, Cosmologia e Gravitação.

A iniciativa para a criação de *As Astrocientistas* surgiu em uma época de retrocessos acadêmicos, devido a motivos políticos e à pandemia global. Este projeto foi pensado como uma resposta positiva, homenageando mulheres que superaram dificuldades históricas e se destacaram em uma área predominantemente masculina. Em fevereiro de 2023, realizamos a segunda edição deste evento, dois anos após a bem-sucedida edição inaugural. Esta edição especial dos *Cadernos de Astronomia* imortaliza os textos produzidos a partir das palestras e pôsteres apresentados na segunda edição do evento, disponibilizando-os para a comunidade brasileira. Dividimos esta edição em três seções.

A primeira seção, *Divulgação Científica, Ciência e Sociedade*, é a mais particular. Nela, apresentamos textos de opinião e divulgação que não caberiam em uma revisão por pares. A seção inicia-se com a transcrição traduzida da palestra-chave do evento, ministrada pela Profa. Jocelyn Bell Burnell, a pioneira no estudo e detecção dos pulsares, que compartilha de forma inspiradora sua trajetória. Em seguida, trazemos a divulgação de um projeto de extensão internacional, o TUIMP, apresentado pela Profa. Natalia Vale Asari. Concluímos com uma reflexão sobre o papel dos homens na luta por equidade na ciência, um ensaio poderoso escrito pelo Prof. Alan Alves-Brito.

As seções *Artigos Completos* e *Resumos de Pôsteres* apresentam os trabalhos das astrocientistas brasileiras. Estes trabalhos, devidamente revisados por pares, mostram a riqueza e a inovação das pesquisas de ponta realizadas por mulheres cientistas brasileiras. Os dezessete textos incluem artigos detalhados de pesquisas consolidadas e apresentações das pesquisas iniciais das futuras gerações de pesquisadoras do país, demonstrando o potencial das meninas e mulheres da astrofísica, cosmologia e gravitação do Brasil.

Agradecemos ao Núcleo de Astrofísica e Cosmologia da Universidade Federal do Espírito Santo (Cosmo-Ufes) e aos editores dos *Cadernos de Astronomia* por viabilizarem a publicação destes Anais nesta edição especial. Estamos especialmente felizes por conseguir realizar uma edição 100% brasileira desta vez, após a primeira edição ter sido financiada por uma instituição estrangeira. Esperamos que apreciem esta leitura.

*Os editores convidados,
CRA, EF, PCMD, TM*

Sumário

Seção Divulgação Científica, Ciência e Sociedade

A descoberta dos pulsares

Jocelyn Bell Burnell 5

TUIMP (The Universe In My Pocket – O Universo no meu bolso)

N. Vale Asari e G. Stasińska 10

Raça, gênero e classe social nas ciências físicas: o silêncio dos homens

Alan Alves-Brito 17

Artigos Completos

O mistério do Local Cosmic Void

C. Franco, F. Avila e A. Bernui 38

Incertezas teóricas em testes do Princípio Cosmológico

Caroline Guandalin 48

Determinação espectroscópica da dispersão de velocidades de galáxias-lente e seu impacto na medida do parâmetro pós-Newtoniano

Ingrid Beloto, Eduardo Cypriano e Martin Makler 60

Estudo do gás difuso ionizado em galáxias *edge-on*

Janayna de Souza Mendes e Natalia Vale Asari 67

Estudo de deflexões de UHECR na presença do campo magnético galáctico JF2012

Larissa Cristina Santos e Rita de Cássia dos Anjos 74

Tensões cosmológicas: status atual e perspectivas futuras

Leila L. Graef 87

Enriquecimento químico nos centros em aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios observados com Suzaku

Rebeca M. Batalha, Renato A. Dupke e Yolando Jiménez-Teja 98

Resumos de Pôsteres

Fotoquímica de Hidrocarbonetos Policíclicos em gelos de água cósmica <i>Ana L. F. de Barros</i>	108
Os efeitos da matéria em neutrinos de supernovas <i>Bianca B. Martins e Pedro C. Holanda</i>	113
Classificação cinemática de AGNs: busca por feedback em galáxias do MaNGA <i>Clara Rosin Gomes, Diogo Martins Souto e Rogemar André Riffel</i>	118
CLASS/HI-CLASS como uma ferramenta de trabalho e ensino de cosmologia e programação <i>Cristiane Fontana</i>	122
Mulheres revolucionárias <i>Évila Talita Silva Aires</i>	124
Testando teorias de gravitação modificada com lentes gravitacionais <i>Fernanda Araujo Oliveira</i>	127
Propriedades estelares de galáxias compactas massivas no Universo Local <i>K. Slodkowski Clerici, A. Schnorr-Müller, M. Trevisan e T. V. Ricci2</i>	130
Medidas de linhas de emissão com aprendizado de máquina <i>Lis Cristine Fortes e Natalia Vale Asari</i>	135
O gás difuso ionizado: modelos de fotoionização <i>M. E. Ramos Pedro e N. Vale Asari</i>	140
Universo primitivo com poeira e gás de Chaplygin <i>Nathália Mattos Novaes da Rocha, Germano Amaral Monerat, Flávio Gimenes Alvarenga, Sergio Vitorino de Borba Gonçalves, Gil Oliveira-Neto, Eduardo Vasquez Corrêa Silva e Cássia Guerra Marques dos Santos Mello</i>	144

A descoberta dos pulsares

Jocelyn Bell Burnell

Universidade de Oxford

Universidade de Dundee

Resumo

Este texto foi extraído da palestra realizada no dia 10 de Fevereiro de 2023 pela autora na segunda edição do evento As Astrocientistas: Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação.¹

Abstract

This text was extracted from the lecture given on February 10, 2023 by the author at the second edition of the event As Astrocientistas: Brazilian Meeting of Girls and Women of Astrophysics, Cosmology and Gravitation.

Palavras-chave: astrofísica, pulsares, mulheres na ciência

Keywords: astrophysics, pulsars, women in STEM

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44950](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44950)

1 Introdução

Hoje vou contar um pouco sobre minha formação e a descoberta dos pulsares. Gostaria de compartilhar algumas histórias sobre quando os pulsares quase foram descobertos em uma série de oportunidades perdidas.

Nasci e cresci na Irlanda do Norte e fui reprovada em um exame importante aos onze anos. Mais tarde, descobri que as notas de aprovação eram mais altas para as meninas do que para os meninos, pela simples razão de que havia meninas “demais” sendo aprovadas no exame. No período seguinte, durante meu primeiro ano no ensino médio, matriculei-me em uma aula de física e fui a melhor da turma, apesar de ter sido reprovada naquele exame importante alguns meses antes.

Tínhamos física no primeiro período, química no seguinte e biologia no terceiro. A última matéria, biologia, achei chata. Durante toda a escola, física foi minha melhor disciplina. Portanto, decidi me matricular em um curso de física quando chegou a hora de ir para a faculdade. Comecei na Universidade de Glasgow, cursando um programa de graduação padrão de física. Já havia decidido que queria me tornar uma radioastrônoma. Depois de me formar, fui

para Cambridge para fazer meu doutorado. Naquela época, Cambridge estava cheia de jovens confiantes e havia muito poucas mulheres lá (felizmente, hoje em dia há mais mulheres no campus).

Senti-me um pouco assustada quando cheguei a Cambridge. Todos os jovens pareciam muito inteligentes e confiantes e pensei que talvez tivessem cometido um erro ao me admitir. “Eles não deveriam ter feito isso. Não sou inteligente o suficiente. Eles descobrirão seu erro e me expulsarão”. Mas, até que isso acontecesse, decidi dar o meu melhor para não me sentir culpada. Queria ter a certeza de que dei o meu melhor e trabalhei duro.

2 Radioastrônoma em formação

Morei em Cambridge, Inglaterra, nessa época da minha vida. Quando comecei meu doutorado em radioastronomia, recebi algumas ferramentas – não eram ferramentas eletrônicas delicadas, mas ferramentas pesadas para trabalhar com fios. Eu estava prestes a fazer um trabalho duro. Estávamos construindo um telescópio projetado para funcionar a 81,5 megahertz e, entre outras tarefas, eu tinha que instalar plugues e tomadas nos cabos e verificar se as conexões estavam boas. Parte desse trabalho foi feito durante o inverno, e tudo que eu tinha como abrigo

¹Transcrição por Alexandre M.R. Almeida; tradução de Olesya Galkina. Texto editado por Carla R. Almeida.

era uma pequena cabana. O telescópio tinha mais de 2.000 antenas (vide Figura 1), mais de 1.000 postes de madeira e quase 200 quilômetros de fios e cabos. Foram necessárias muitas pessoas para construir aquele radiotelescópio em apenas dois anos.

Naquela época, os quasares, eram um grande quebra-cabeça. Quando a radioastronomia teve seu início, a primeira coisa que as pessoas observaram foram algumas dessas fortes fontes de rádio. Quando questionamos os astrônomos ópticos sobre o que eram, eles responderam que pareciam estrelas, mas não eram o tipo de estrela que conhecíamos. Eles ficaram conhecidos como fontes de rádio quase estelares ou, abreviadamente, quasares. Martin Schmidt e Jesse Greenstein obtiveram espectros ópticos desses objetos, mas não conseguiram entendê-los até que, de repente, Martin pensou: “É um espectro de hidrogênio com um grande desvio para o vermelho?”

E foi, de fato, um desvio para o vermelho extremamente grande. Tão grande que Martin mal podia acreditar. Ele foi ao escritório de Jesse e descobriu que Jesse também tinha o espectro de outro quasar. Jesse pensou que esses objetos provavelmente eram feitos de telúrio e começou a escrever um artigo sobre a hipótese desses objetos serem ricos em telúrio. Quando Martin pediu a opinião de Jesse sobre sua interpretação dos espectros, Jesse também percebeu imediatamente. Era hidrogênio com um desvio para o vermelho muito grande.

Mas esse desvio para o vermelho exagerado era perturbador. Isso implicava que esses objetos estavam muito distantes, mas também que eram muito brilhantes. Esperávamos que os objetos distantes fossem fracos. Mas estes quasares quebraram esta regra. E eles são incrivelmente compactos. Os sinais de rádio de objetos compactos chegam através do vento solar. E a densidade desse vento não é uniforme, então se comporta como uma tela de difração que passa, variando rapidamente. Isso é chamado de cintilação interplanetária.

Naquela época, em Cambridge, a Universidade tinha um computador. Apenas um. Foi a época antes dos transistores. Os primeiros computadores foram feitos com tubos de vácuo, ocupavam uma sala inteira e tinham menos memória que um laptop moderno. Portanto, toda a universidade tinha um computador com menos memória que o seu laptop e muito poucas pessoas podiam usá-lo. Nós não fomos um dos sortudos. Meus dados vieram em cópias impressas em papel milimetrado. É muito papel milimetrado!

30 metros todos os dias. Uma varredura do céu durou quatro dias, 120 metros. Depois de seis meses, eu tinha cinco quilômetros desse papel e tive que analisá-los manualmente porque não tínhamos acesso a um computador.

Continuamos examinando o céu, levando quatro dias para fazer uma varredura e repetindo o processo. Foi um programa de sucesso. Começamos com cerca de 20 quasares conhecidos e, quando terminamos a pesquisa, tínhamos 200 quasares. Fui muito metódica porque pensei que iriam me expulsar. Mas havia um pedacinho de aproximadamente de cinco milímetros no gráfico que não fazia sentido. Eram cinco milímetros que eu não conseguia entender.

3 A descoberta dos pulsares

Este sinal se repetiu no horário sideral, chegando cerca de 23 horas e 56 minutos depois. Portanto, provavelmente não foi feito pelo homem, porque os astrônomos são os únicos que marcam o dia com 23 horas e 56 minutos. Uma possibilidade era que eu tivesse conectado o telescópio de maneira errada ou talvez o receptor estivesse se comportando mal. Para testar isso, pedimos a um colega com um radiotelescópio e um receptor separados para examiná-lo, confidencialmente. E eles confirmaram nossa observação.

Portanto, não foi interferência terrestre, pois manteve o tempo sideral. E também não se tratava de um equipamento defeituoso, pois era detectável por um conjunto diferente de equipamentos; deve ser algo lá fora.

Nós o apelidamos de *Little Green Men* (homenzinhos verdes, em português), mas esse não era um nome sério. Pensamos que se viesse de um planeta que orbita uma estrela, então, esperávamos ver pulsos mais curtos quando este se aproximasse de nós e os pulsos mais longos quando estes se afastasse. É o efeito Doppler. Mas as observações não se enquadraram de forma óbvia neste padrão. Vimos apenas o deslocamento Doppler devido ao movimento da Terra em torno do Sol.

Então encontrei um segundo. E um terceiro. E um quarto. Encontrar mais dessas estrelas foi um grande alívio. Conseguimos obter uma medição de dispersão e estabelecer que estavam a cerca de 200 anos-luz de distância. Primeiro, confirmamos com outro telescópio que nosso equipamento não estava errado (e



Figura 1: Aqui está o radiotelescópio. Os postes de madeira mantêm os fios de cobre desencapados afastados da grama. As antenas capturam os sinais que percorrem os laços do fio e os enviam de volta aos receptores no laboratório.

agora havíamos encontrado mais deles). Foi incrível! Publicamos o artigo sobre a primeira observação [1] e relatamos as outras três em uma publicação posterior [2]. Poucos dias antes do lançamento do primeiro artigo, Tony,² meu supervisor, apresentou um colóquio em Cambridge com um título emocionante, “Descoberta de um novo tipo de objeto”.

Nessa fase, havia duas possibilidades para este objeto: poderia estar vibrando ou poderia estar girando. O teste crucial para determinar qual é qual era observar ao longo do tempo. Se estiver vibrando, ficaria mais rápido à medida que envelhece. Se estiver girando, ele desaceleraria antes de parar. Então, com o tempo, se ficar mais rápido está vibrando, e se ficar mais lento está girando. Seis meses depois, outros astrônomos determinaram que o primeiro pulsar ficou mais lento à medida que envelhecia, então era um objeto giratório.

Quando Tony apresentou o colóquio, ele sugeriu que esse objeto era uma estrela, como uma anã branca, provavelmente a estrela mais compacta possível, que vibrava e lançava ondas de choque em sua atmosfera. Nós as detectamos como pulsos de rádio. Lembro-me de Fred Hoyle³ sentado na primeira fileira e foi a primeira pessoa a falar. Ele disse: “Não acho que seja uma anã branca, acho que é uma estrela de nêutrons”. E ele estava certo!

Hoyle ouviu falar disso pela primeira vez nesta palestra de 40 minutos, absorveu a informação e encontrou uma explicação melhor! Ele tinha um cérebro incrível. Naquele momento, Tony ainda estava conven-

cido de que se tratava de um objeto oscilante. Quando medimos a derivada do período e pudemos ver que ela estava, de fato, desacelerando, então tinha que ser um objeto giratório.

A *Nature* e outros jornais tomaram conhecimento das nossas descobertas e isso foi particularmente difícil para mim. Normalmente, Tony Hewish e eu éramos entrevistados juntos por jornalistas e eles perguntavam a Tony sobre o significado astrofísico desta descoberta. Eles então se voltavam para mim, uma jovem, e me faziam perguntas como: Quantos namorados eu tive? Quais eram minhas medidas de busto, cintura e quadril? Eu descrevia meu cabelo como moreno ou loiro? (Nenhuma outra cor era permitida). Foi decepcionante, para dizer o mínimo. Eu era simplesmente um objeto sexual, não uma cientista.

Porém, o correspondente científico Anthony Michaelis, que trabalhava para o jornal *Daily Telegraph*, um jornal inteligente embora conservador, perguntou-me como denominamos este objeto. Já havíamos pensado um pouco sobre isso e chegamos com duas alternativas: fonte de rádio pulsante ou fonte de rádio pulsada. Optamos por ‘pulsante’, porque ‘pulsado’ poderia ser interpretado como se alguém estivesse produzindo esses pulsos (homenzinhos verdes). “Fontes de rádio pulsantes”, respondi. E o Sr. Michaelis rejeitou o nome, alegando que era muito longo. “Que tal pulsar?” ele sugeriu em justaposição à palavra ‘quasar’. Pulsar foi nomeado por este homem, Anthony Michaelis.

²Anthony Hewish, rádio astrônomo britânico.

³Fred Hoyle foi um astrônomo e cosmólogo inglês que fez contribuições significativas aos campos da nucleossíntese estelar, da origem da vida e da teoria do estado estacionário do universo.

4 Quase descobertas: oportunidades perdidas

Às vezes, em uma conferência, ouvi histórias interessantes de pessoas que me contaram como “quase” descobriram os pulsares. Essas histórias nos contam muito sobre como a ciência funciona, por isso gostaria de compartilhá-las com você.

O primeiro aconteceu por volta de 1957. A história me foi contada por Elliott Moore, na época estudante de verão no Observatório McDonald. Era uma noite em que o telescópio foi aberto ao público e o técnico o havia ajustado para observar a Estrela de Minkowski, o curioso objeto estelar situado no centro da Nebulosa do Caranguejo.⁴ Naquela noite, uma jovem aproximou-se do telescópio e disse que a estrela estava piscando. Ela era uma piloto de avião que voava à noite. Seu trabalho era pilotar aviões da fábrica até o cliente. Ao ouvir seu comentário, o assistente noturno do telescópio explicou-lhe sobre a cintilação, a atmosfera da Terra e o brilho das estrelas. Ela obviamente conhecia as constelações e a cintilação ou brilho das estrelas. Não foi isso. A estrela estava piscando!

O interessante sobre isso é que a estrela da Nebulosa do Caranguejo pisca. Ela pisca a 30 Hertz, 30 flashes por segundo, o que está próximo do limite que o ser humano pode ver. No entanto, algumas mulheres jovens conseguem ver 30 Hertz; mulheres jovens no Canadá costumavam reclamar porque lá a fonte de alimentação principal era de 30 Hertz e eles podiam ver as luzes e coisas piscando a 30 Hertz. Essa piloto de avião em particular provavelmente podia ver a estrela brilhando, mas ninguém seguiu essa pista.

Há também o senhor que identificou 14 sinais pulsantes enquanto estava estacionado no Alasca na década de 1980 à procura de mísseis vindos da União Soviética [4]. Charles Schisler trabalhou para os militares dos EUA, operando um radar militar. Quando estava tranquilo, ele podia brincar com o equipamento e usava o equipamento receptor para olhar o céu. Quando ele era estudante universitário, ele fez um curso de astronomia. Ele sabia sobre ascensão reta e declinação, então registrou em um pedaço de papel a ascensão reta e a declinação das fontes pulsantes que encontrou, uma das quais estava na Nebulosa do Caranguejo.

Illegalmente, ele levou aquele pedaço de papel con-

⁴Em 1942, o astrônomo Rudolf Minkowski descobriu uma estrela que mais tarde foi aceita como sendo o remanescente de uma supernova da Nebulosa do Caranguejo [3].

sigo quando deixou o serviço militar. Em 2007, ele descobriu o catálogo australiano de pulsares online, que continha 11 dos objetos pulsantes que ele havia identificado décadas antes. No momento de sua descoberta, ele não poderia publicá-los, proibido pela Força Aérea dos EUA. Mas aos 81 anos, ele estava muito entusiasmado por trocar correspondências com os astrônomos australianos sobre as suas descobertas. Outro exemplo de pulsares quase descobertos envolve Sue Simkin. Sue Simkin foi criada no Canadá na época em que a fonte de alimentação era de 30 Hertz e ela era uma das mulheres que conseguia ver o flash. Nesta fase, ela estava trabalhando em astronomia ultravioleta e foi solicitada a capturar o espectro daquela curiosa estrela no centro da Nebulosa do Caranguejo. A estrela estava opaca, mas ela podia ver ondas saindo dela. Não acreditaram nela até que a descoberta dos pulsares foi anunciada. Então eles disseram: “Sim, talvez você tenha visto alguma coisa mesmo”.

Para o exemplo final, não vou citar os nomes das pessoas envolvidas. Eram radioastrônomos que ficaram muito envergonhados por não terem notado os pulsares. Ao terminar de mapear todo o céu a 408 Megahertz com o maior telescópio do mundo, com apenas um ou dois pequenos fragmentos para preencher, um dos gravadores⁵ se comportou mal. Certo dia, às três horas da manhã, aquele gravador de dados começou a varrer regularmente pelo papel. Um astrônomo xingou o suposto mau funcionamento e bateu nele – porque essa era a técnica mais utilizada para fazer um gravador parar de grudar. O gravador parou de varrer e voltou ao seu padrão normal, então o astrônomo vestiu o casaco e foi para casa, para a cama, sem fazer qualquer registro no diário.

O que eles estavam observando era o objeto conhecido como pulsar 0329+54. Mas, como não fez qualquer registro no diário, esta descoberta não pôde ser posteriormente reivindicada.

Além disso, na sequência do anúncio da descoberta dos pulsares, eles não verificaram os seus dados para ver se conseguiam encontrar algum pulsar ali, porque o que observaram não foi o que primeiro que encontramos. Apareceu mais tarde. Por isso é importante usar seu livro de registros, pessoal! Anote qualquer coisa peculiar que aconteça. Você pode ter feito uma descoberta importante e precisará da documentação posteriormente.

⁵Não havia computadores naquela época.

Quero terminar prestando homenagem a Franco Paccini, astrofísico italiano.

A razão pela qual a Nebulosa do Caranguejo ainda brilhava era um enigma considerável antes da descoberta dos pulsares. Sabia-se que se tratava de uma supernova e que a nebulosa era inicialmente os destroços da explosão da estrela. Mas com o tempo, esses destroços deveriam ter ficado cada vez mais fracos, mas ainda assim continuavam a brilhar. Por que esta nebulosa continuava brilhante?

Franco Paccini apresentou a explicação de que poderia haver uma estrela de nêutrons no meio da Nebulosa do Caranguejo, com um grande campo magnético e inclinação ao eixo de rotação. Isso produziria radiação dipolo magnética na rotação. E se a nebulosa fosse densa o suficiente, essa radiação não escaparia, ficaria presa na nebulosa e a manteria brilhando.

Ele estava absolutamente certo! Isso foi antes da descoberta dos pulsares e ele acertou em cheio na explicação do porquê a Nebulosa do Caranguejo continua brilhando. Ele era um astrofísico brilhante.

5 Conclusões

Por fim, minhas observações finais pretendem resumir as principais etapas da descoberta. Em primeiro lugar, eu tinha meu próprio telescópio e receptores e me certifiquei de entender como eles se comportavam. Eu sabia sobre suas anomalias. Como pesquisadora, tive tempo e espaço para fazer isso. Sofrer da Síndrome do Impostor foi fundamental. A ansiedade de pensar que eles iriam me expulsar me fez trabalhar ao máximo. Fui minuciosa e acompanhei as anomalias. Esta foi uma das primeiras observações feitas com um curto tempo de exposição. Até então, eram necessários períodos de integração mais longos e estes teriam mediado o processo. E, aliás, não tínhamos conhecimento de quaisquer outros observadores que pudessem fazer a mesma descoberta, por isso podíamos ter cuidado.

Hoje em dia, está na moda definir objetivos ou metas para programas. Se tivéssemos conseguido informatizar a busca, se tivéssemos acesso a um computador, teríamos programado o computador para procurar o que encontramos? Nem sabíamos que existia, então possivelmente não. Se tivesse sido automatizado, poderíamos ter perdido a descoberta. Essas baixas frequências e alta resolução temporal têm sido

uma combinação fora de moda. Mas agora vemos que está voltando a ser explorado novamente.

Obrigado pelo seu interesse e obrigado pela sua atenção.

Sobre a autora

Jocelyn Bell Burnell descobriu pulsares quando era uma doutoranda trabalhando com o radiotelescópio de Cambridge, abrindo um novo ramo na astrofísica - trabalho reconhecido pelo Prêmio Nobel que seu orientador recebeu. Em sequência, ela trabalhou com diversas atuações em muitas outras áreas da astronomia, se ocupando profissionalmente por meio período enquanto criava sua família. Atualmente é uma Acadêmica Visitante em Oxford e a Chanceler da Universidade de Dundee, na Escócia. Ela foi presidente da Sociedade Acadêmica Real do Reino Unido, em 2008 se tornou a primeira mulher presidente do Instituto de Física do Reino Unido e da Irlanda, e em 2014 se tornou a primeira mulher presidente da Sociedade Real de Edimburgo. Ela foi uma das integrantes de um grupo de mulheres cientistas que propôs o esquema Athena SWAN. Jocelyn já recebeu muitas honras, incluindo um prêmio de *Breakthrough* de 3 milhões de dólares em 2018. Sua apreciação pública e o reconhecimento da importância da ciência que ela desenvolve sempre foram importantes para ela, e ela é muito procurada como palestrante e locutora. Em seu tempo livre, ela gosta de jardinagem, de ouvir música de coral e é da comunidade *Quaker*. Jocelyn também co-editou uma antologia de poemas com tema astronômico: "*Dark Matter; Poems of Space*" (Matéria escura; Poemas do espaço).

Referências

- [1] A. Hewish et al., *Observation of a rapidly pulsating radio source*, *Nature* **217**, 709 (1968).
- [2] J. Pilkington et al., *Observations of some further pulsed radio sources*, *Nature* **218**(5137), 126 (1968).
- [3] F. C. Michel, *Neutron Star in Crab Nebula-Really?*, *Comments on Astrophysics and Space Physics* **4**, 101 (1972).
- [4] G. Brumfiel, *Air force had early warning of pulsars.*, *Nature* **448**(7157), 974 (2007).

TUIMP (*The Universe In My Pocket – O Universo no meu bolso*)

N. Vale Asari¹ e G. Stasińska²

¹Universidade Federal de Santa Catarina

²Observatoire de Paris

Resumo

O projeto TUIMP (do inglês *The Universe In My Pocket – O Universo no meu bolso*; <https://www.tuimp.org>) dedica-se à produção de livros sobre Astrofísica destinados a crianças, adolescentes e curiosos de qualquer idade. Disponíveis de forma gratuita, esses livros podem ser impressos em uma única folha de papel. São elaborados e revisados por profissionais da área de astronomia e traduzidos em quatorze línguas por astrônomos profissionais e estudantes de astronomia ao redor do mundo, abrangendo o português, afaan oromo, albanês, árabe, armênio, inglês, espanhol, francês, grego, isiZulu, italiano, polonês, romeno e russo.

Abstract

The TUIMP project (*The Universe In My Pocket* <https://www.tuimp.org>) is dedicated to the production of books on Astrophysics aimed at children, teenagers and those curious of any age. Available free of charge, these books can be printed on a single sheet of paper. They are prepared and reviewed by professionals in the field of astronomy and translated into fourteen languages by professional astronomers and astronomy students around the world, covering Portuguese, Afaan Oromo, Albanian, Arabic, Armenian, English, Spanish, French, Greek, isiZulu, Italian, Polish, Romanian and Russian.

Palavras-chave: astrofísica, educação, divulgação

Keywords: astrophysics, education, outreach

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44954](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44954)

1 Introdução

É um ritual comum: voltamos de museus e palestras com panfletos que guardamos como pequenos tesouros. Quando abrimos as gavetas repletas de recordações, somos transportados de volta às exposições que visitamos. Os livrinhos do TUIMP (do inglês *The Universe In My Pocket – O Universo no meu bolso*) foram criados para serem lembranças tangíveis de uma jornada pela astronomia.

O primeiro desses livrinhos surgiu em 2013, durante a primeira edição da escola NEBULATOM em Choróní, Venezuela. Foi nesse momento que Grażyna, ao se tornar pesquisadora emérita, inventou o projeto e passou a dedicar bastante tempo a ele. Apresentações anteriores sobre o TUIMP foram feitas na Conferência CAP: *Communicating Astronomy with the Public* [1] de 2018 e no Simpósio n° 367 da União Astronômica Internacional [2] de 2020.

O TUIMP transcende fronteiras, com autores e tradutores de diversas partes do mundo. Os livrinhos têm hoje vida em 14 idiomas: afaan oromo, albanês,

árabe, armênio, inglês, espanhol, francês, grego, isiZulu, italiano, polonês, português, romeno e russo; em breve se juntarão ao rol o amárico e o ucraniano.

A missão é que os livros cheguem a qualquer pessoa de 9 a 99 anos. O projeto é todo gratuito, não precisa de financiamento, e todas pessoas que contribuem com o TUIMP são voluntários e dão seu tempo de graça. O acesso aos livrinhos também é simples e gratuito: é necessário somente um computador ou celular com internet e uma visita ao site (veja a captura de tela da página inicial na Figura 1) em <https://www.tuimp.org>!

Cada livrinho possui 16 páginas, projetadas para serem impressas em uma única folha no formato A4 ou carta. A Figura 2 mostra uma captura de tela do vídeo que ensina a dobrar e montar um livrinho, e a Figura 3 é uma foto de um livrinho pronto para ser lido em papel. No Apêndice A, fornecemos a versão para impressão de um livrinho, que também pode ser baixada diretamente de <https://www.tuimp.org/pt/booklet/3>.



Figura 1: Capa inicial do site do TUIMP (<https://www.tuimp.org>) em português. Crédito de desenvolvimento do site: Fabricio Chiquio Boppré.



Figura 2: Captura de tela do vídeo que ensina a dobrar e montar os livrinhos do TUIMP; vídeo disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=8fD2uRa9p7o>. Crédito do vídeo: Natalia Vale Asari.

2 Os livrinhos do TUIMP

Cada livrinho do TUIMP passa por um rigoroso processo de criação. São escritos por astrônomos profissionais e minuciosamente revisados por árbitros externos. A tradução fica a cargo de profissionais ou estudantes de astronomia, mantendo uma linguagem acessível e conceitos claros. As fotos e ilustrações vêm de fontes verificadas, e os livros são publicados sob a licença aberta *Creative Commons CC-by*, possi-






Figura 3: Exemplar dobrado e pronto para ser lido e apreciado. Crédito da foto: revista “Urania”, da Polônia.

bilitando o compartilhamento e adaptação, desde que haja o devido crédito, indicação das alterações feitas e o link para a licença.

A estrutura dos livros é organizada com pequenos textos nas páginas ímpares e ilustrações nas páginas pares. Ao final, um desafio aguarda o leitor, com a pergunta na contracapa e a resposta na penúltima pá-

Tabela 1: Edições do TUIMP atualmente disponíveis em português, em níveis de complexidade. Crédito dos desenhos dos níveis de complexidade: Paola Moreira Delgado.

Nível de complexidade	Ed. Nº	Título	Autor(es)
Básico 	1	O universo nebular	Grażyna Stasińska
	3	O reino das galáxias	Grażyna Stasińska
	4	O Sistema Solar	Gloria Delgado Inglada
	5	Figuras no céu	Grażyna Stasińska
	7	Os cheiros do Universo	Gloria Delgado Inglada
	11	Os tamanhos dos corpos celestes	Grażyna Stasińska
	25	A Terra	Julieta Fierro & Grażyna Stasińska
	27	A Lua	Julieta Fierro & Grażyna Stasińska
	34	Eu descobro o Sol, a Terra e o céu	Grażyna Stasińska
	35	A vida na estação espacial	Julieta Fierro & Grażyna Stasińska
Intermediário 	6	Quasares e outros monstros	Grażyna Stasińska
	9	O universo de altas energias	Mimoza Hafizi
	14	Nós viemos das estrelas	Grażyna Stasińska
	21	Ameaças cósmicas	Georges Alecian
	22	Cometas	Grażyna Stasińska
	24	A cor do céu	Julieta Fierro
	38	Luas do Sistema Solar	Julieta Fierro
Avançado 	2	O universo invisível	Grażyna Stasińska
	8	Exoplanetas	Jean Schneider & Grażyna Stasińska
	10	A nebulosa do Caranguejo	Grażyna Stasińska
	12	O Big Bang	Françoise Combes
	13	A teia cósmica	Françoise Combes
	15	Distâncias no Universo	Christiane Vilain
	17	Buracos negros	Frederic Vincent
	23	O nascimento e a vida das galáxias	Marina Trevisan
	30	Decifrando a luz das estrelas	Grażyna Stasińska
	32	Noite e dia	Rogério Riffel
36	Nebulosas planetárias	Grażyna Stasińska	

gina. A lista dos TUIMPs em português, com o nível de complexidade, está detalhada na Tabela 1. Os de nível fácil são ideais para o ensino fundamental, enquanto os de nível intermediário e avançado são adequados para o ensino médio e, até mesmo, universitário.

Curiosidades aguardam quem se aventura pelos livrinhos do TUIMP. Sabia que as estrelas não são eternas e que nascem, evoluem e morrem (TUIMP nº 1)?

Ou que uma enorme quantidade de radiação invisível do espaço nos ajuda a compreendê-lo (TUIMP nº 2)? E que a luz das galáxias se desloca para o vermelho porque elas se afastam de nós (TUIMP nº 30)? A Tabela 2 traz mais algumas curiosidades que você pode encontrar nos livrinhos do TUIMP.

Tabela 2: Algumas curiosidades que você vai encontrar em edições do TUIMP!

Ed. Nº	Curiosidade
1	O espaço que parece vazio entre as estrelas está cheio de nebulosas!
6	Todas as galáxias contêm um buraco negro supermaciço.
11	Cerca de um micrometeorito a cada metro quadrado chega à Terra a cada ano.
14	Apenas nos últimos 80 anos descobrimos a origem dos elementos presentes em nossos corpos: eles vêm das estrelas.
21	A extinção dos dinossauros foi devida a uma colisão com um asteróide.
22	Grande parte da água de oceanos na Terra viria dos cometas que a impactaram.
24	Qual será que é a cor do céu na Lua?
27	Por que a Lua parece maior quando está perto do horizonte?
35	Por que no espaço os astronautas comem tortilhas mexicanas em vez de pão?

3 Alcance

Os acessos mais significativos na internet vêm da Albânia, possivelmente devido à escassez de material sobre astronomia nesse país. Contudo, os livrinhos do TUIMP não se restringem ao mundo virtual, e têm sido usados em diversos espaços.

Um exemplo é a integração na sala de aula, como em Jimma, na Etiópia. No Brasil, o TUIMP sobre buracos negros foi empregado no primeiro ano do ensino médio no Colégio de Aplicação da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis (SC), como parte de uma introdução à gravitação de um estágio de licenciatura em Física. Além disso, os TUIMPs têm marcado presença em visitas de estudantes de astronomia como ferramenta de divulgação científica em locais como Choróní (Venezuela), Zihuatanejo (México) e Baía Formosa (RN, Brasil).

Os livrinhos do TUIMP também foram levados a festivais de astronomia, palestras públicas, planetários (sobre tudo na França), e até mesmo distribuídos como presentes para familiares, amigos e pessoal de hotéis, dentre outros. Na França e na Polônia, diversas edições do TUIMP foram inclusas nas revistas “l’Astronomie” e “Urania”, ampliando seu alcance para astrônomos amadores e profissionais da educação.

Em alguns países, grupos de tradução foram montados como uma verdadeira força-tarefa para traduzir os livrinhos de maneira rápida e lúdica. Na Argélia, a Associação Astronômica Sirius, localizada em Constantina, entrou em contato através do site em 2019 e iniciou traduções para o árabe. Tanto na Universi-

dade de Pádua, na Itália, quanto na Universidade de Jimma, na Etiópia, grupos se reúnem para fazer as traduções para italiano e afaan oromo, uma das principais línguas em Etiópia.

4 Sumário e divulgação do TUIMP no Brasil

O projeto TUIMP disponibiliza de forma gratuita livros de Astrofísica que podem ser acessados via computador ou celular, ou ainda impressos em uma única folha. Cada livro é cuidadosamente escrito e revisado por astrônomos profissionais, e traduzido para diversas línguas (até o momento, em 14 idiomas) por astrônomos ou estudantes de astronomia. O acesso gratuito proporciona uma oportunidade única para indivíduos que têm acesso limitado a materiais sobre astrofísica em suas línguas.

Os livros do TUIMP são versáteis, sendo adequados para crianças, adolescentes e entusiastas da astrofísica de todas as idades. Sua utilização pode ser formal, em ambiente escolar, ou informal, como ferramenta de divulgação científica ou em casa. Os acessos ainda são poucos no Brasil, provavelmente por falta de informação de que o projeto existe. Incentivamos professores, estudantes, curiosos (e também parentes) a explorarem esses recursos valiosos e a divulgá-los!

Agradecimentos

NVA agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Apêndice A: TUIMP n° 3: o reino das galáxias

As próximas duas páginas apresentam o livrinho TUIMP n° 3, intitulado “O Reino das Galáxias”, disponível também em <https://www.tuimp.org/pt/booklet/3>. Este material é categorizado como de nível fácil, adequado para o ensino fundamental. Se optar por imprimir, certifique-se de fazê-lo em frente e verso, garantindo que a cruz de um lado da página coincida exatamente com a cruz da outra página. Para a montagem, siga o vídeo disponível no link <https://www.youtube.com/watch?v=8fD2uRa9p7o>. Caso prefira aventurar-se sem um vídeo, dobre ao longo da linha pontilhada 1, e em seguida, da linha pontilhada 2. Depois, corte nas linhas tracejadas marcadas com 3 e, por fim, dobre ao longo da linha pontilhada 4. Una as páginas do livrinho com grampo ou cola, e desfrute da leitura!

Sobre as autoras

Natalia Vale Asari é professora no Departamento de Física da UFSC desde 2014 e subcoordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física da UFSC desde 2021. Recebeu o Prêmio Carolina Nemes da Sociedade Brasileira de Física em 2019. Sua pesquisa, em colaboração com colegas na França, México, Polônia e Escócia, é voltada para populações estelares e abundâncias químicas de galáxias.

Grażyna Stasińska é astrônoma emérita do Observatório de Paris. Trabalhou principalmente em nebulosas planetárias e na composição química de galáxias, especialmente com colegas da Polônia, México e Brasil. Atualmente, ela dedica grande parte de seu tempo ao projeto TUIMP.

Referências

- [1] G. Stasińska, *TUIMP: The Universe In My Pocket. Free astronomy booklets in all languages* (2018). [ArXiv:1806.02671](https://arxiv.org/abs/1806.02671).
- [2] G. Stasińska, *TUIMP: The Universe In My Pocket, Proceedings of the International Astronomical Union* **15**(S367), 371–373 (2019).

Grażyna Stasińska
Observatório de Paris



O Universo no meu bolso

O reino das galáxias

Soluções no verso



Qual dessas não é uma galáxia?

Desafio



Galáxias elípticas

As galáxias elípticas podem ser redondas ou alongadas. Ao contrário das galáxias espirais, elas são suaves e de brilho fraco. Elas são formadas de estrelas velhas, o que lhes dá uma cor avermelhada. Eles contêm pouco gás ou poeira.

As galáxias elípticas menores, chamadas 'elípticas anãs', têm diâmetros de dez mil anos-luz (dez vezes menores do que a Via Láctea) e contêm apenas dez milhões de estrelas. As maiores galáxias elípticas têm diâmetros de um milhão de anos-luz, e contêm mais de 10^{13} * estrelas.

Em galáxias elípticas, ao contrário das espirais, as estrelas se movem em todas as direções, sem rotação coerente.

* dez trilhões



Dois galáxias elípticas: NGC 3311 e NGC 3309.
Esta é uma imagem obtida com o telescópio Gemini-Sul por Elizabeth Wehner e William Harris.

Interação entre galáxias

As galáxias não vivem sozinhas. Enquanto galáxias espirais tendem a ser encontradas em regiões bastante isoladas do Universo, as elípticas tendem a se agrupar. Galáxias que estão próximas umas das outras podem interagir de diferentes maneiras: Colisão de galáxias espirais podem fundir e formar uma elíptica. Uma galáxia passando perto de outra irá arrastar consigo uma longa cauda de estrelas.

As interações mudam não só as formas das galáxias: elas estimulam a formação de novas gerações de estrelas.

A maioria das galáxias provavelmente interagiu no passado.



ESO 593-B: um par de galáxias em interação. As duas componentes provavelmente formarão uma única galáxia no futuro.



NGC 6021 e NGC 6022, um par de galáxias em interação. O encontro formou uma longa cauda saindo de NGC 6021.

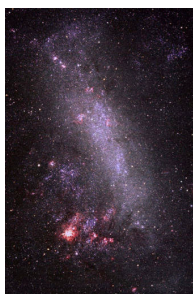


Faixas fracas de estrelas em torno da galáxia espiral inclinada NGC 5907. Imagem por J. Gabany, Observatório Blackbird.

M31, a galáxia de Andrômeda, a galáxia espiral mais próxima. Esta imagem foi obtida com um telescópio pequeno por Lorenzo Comoli.



A Grande Nuvem de Magalhães, a galáxia mais próxima da Via Láctea.



Das nebulosas às galáxias

Outros padrões nebulosos podem ser vistos no céu. Em 1781, Charles Messier listou 104 deles em seu famoso catálogo.

A espectroscopia (iniciada pelo astrônomo amador Huggins em 1863) mostrou que havia dois tipos de nebulosas: nebulosas gasosas e nebulosas estelares.

Se essas nebulosas estavam localizadas dentro ou fora da Via Láctea foi duramente debatido até Edwin Hubble medir a distância a uma delas em 1924.

Mostrou-se então que muitas dessas nebulosas eram de fato 'universos-ilha' semelhantes à nossa galáxia, a Via Láctea. Essas nebulosas são agora chamadas de galáxias.

Todos já vimos a grande faixa de luz turva cruzando o céu em noites escuras. Os gregos antigos chamavam-na de Via Láctea. Para os antigos egípcios e os antigos chineses, ela era um rio celestial, enquanto os siberianos viam-na como a costura na tenda do céu. Desde os tempos os mais antigos, os cientistas tentaram compreender a sua natureza. Muitos, como Anáxagoras na Grécia antiga, ou Al Biruni na Pérsia medieval, consideravam que ela era feita de muitas estrelas vistas muito próximas entre si. Esta ideia provou-se correta quando Galileu Galilei observou a Via Láctea com seu telescópio em 1610 e mostrou que ela era realmente composta de um grande número de estrelas fracas.

3



A galáxia espiral NGC 1232 e a sua pequena companheira NGC 1232A. Esta foto foi obtida com o Very Large Telescope no ESO no Chile.



NGC 4565: uma galáxia espiral vista de lado. Esta imagem foi obtida por Keith Quattrocchi, com um telescópio de 40 cm.

6

O diapasão de Hubble

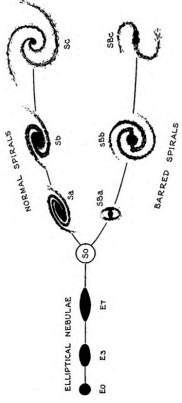
Depois de analisar as imagens de cerca de 400 galáxias, Edwin Hubble inventou uma maneira de classificar suas formas (ver página oposta).

Mesmo depois de algumas mudanças, para por exemplo incluir galáxias irregulares, a classificação de Hubble continua sendo a mais popular.

Hoje em dia, os astrónomos podem medir as massas de galáxias e descobriram que a sequência de Hubble - de elípticas a espirais - é uma sequência de massas galácticas cada vez menores.

Ainda não se sabe bem por que as formas e massas de galáxias estão tão ligadas.

11



O diagrama do diapasão foi desenhado por Hubble em seu livro de 1936 'O Reino das Nebulosas'.



O Diapasão visto em fotos modernas: NGC 1407 (E0), NGC 1052 (E3), NGC 4270 (E7), NGC 7192 (S0), NGC 4888 (Sa), NGC 1039 (Sb), NGC 628 (Sc), NGC 936 (SBa), NGC 5850 (SBb) NGC 7479 (SBc).

10

Galáxias espirais

Este é o tipo mais comum de grandes galáxias no Universo local. Elas têm 'braços' espirais que se desenrolam a partir de um bojo central.

Ao longo dos braços espirais, encontramos nuvens de gás e poeira onde novas estrelas estão sendo formadas. Entre os braços e no bojo, as estrelas são mais velhas. Eles são amarelas e têm tipicamente bilhões de anos, enquanto nos braços as estrelas são azuis, e têm somente cerca de um milhão de anos de idade.

As galáxias espirais contêm tipicamente 10¹¹ * estrelas. A Via Láctea é uma galáxia espiral.

*cem bilhões 7



A Via Láctea com Orion vista do Lago Lake Tahoe em Nevada (Estados Unidos).



Desenho de Galileu da Via Láctea perto de Orion: os asteriscos pequenos representam estrelas fracas.

2

NGC 524. uma galáxia SO

intermediária entre elíptica e espiral

NGC 4361

NGC 3628

galáxia do Hambúrguer

uma nebulosa planetária

NGC 2442

A galáxia Gancho de Carne

M 104. O Sombreiro

Uma galáxia de perfil do tipo Sa

O Universo no meu bolso No. 3

Este livreto foi escrito em 2015 por Grażyna Stasińska do Observatório de Paris (França) e traduzido por Natália Vale Assari da Universidade Federal de Santa Catarina (Brasil).

A maioria das fotos foram obtidas com os grandes telescópios do ESO e com o Telescópio Espacial Hubble. Elas são fornecidas por: NASA, STScI, e ESA.

A foto da Via Láctea com Orion é por by Wally Pacholka (TWAN)

A foto da capa representa o sistema de galáxias em interação, Arp 221, ver www.astronomynewsworld.com/photo-gallery-1/galaxies-clusters/arp-227/



Para saber mais sobre essa série e sobre os tópicos deste livreto, visite <http://www.tuimp.org>

TUIMP Creative Commons



Raça, gênero e classe social nas ciências físicas: o silêncio dos homens

Alan Alves-Brito

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo

Ensaio produzido a partir da palestra *Questões étnico-raciais e de gênero nas ciências físicas: o silêncio dos homens*, ministrada pelo autor durante a segunda edição do evento *As Astrocientistas: Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação*, realizado entre os dias 07 e 10 de fevereiro em 2023. Nesse ensaio, eu apresento uma revisão das principais questões que temos articulado nas ciências físicas para (re)pensar o lugar e o papel dos homens e das masculinidades nas discussões de raça, classe social e gênero nas ciências físicas, tendo os movimentos sociais feministas, de pessoas negras e LGBTQIA+ como movimentos educadores.

Abstract

Essay extracted from the talk titled *Race and Gender in the physical sciences: the problem with men's silence*, offered by the author on the second edition of *As Astrocientistas: Brazilian Meeting of Girls and Women on Astrophysics, Cosmology, and Gravitation*, February 07th to 10th, 2023. In this essay, I present a review of the main questions we have been working on in the physics sciences to (re)think about the place and role of men and masculinity in the discussions about race, social class, and gender in physics, taking as educational models the feminist, BIPOC, and LGBTQIA+ movements.

Palavras-chave: diversidade, inclusão, mulheres na ciência, vieses étnico-raciais.

Keywords: diversity, inclusion, women in science, ethnic-racial biases

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44894](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44894)

1 Introdução

Tem-se produzido, nos últimos anos, uma série de evidências que materializam as violências raciais, de gênero e classe social que têm sido perpetradas historicamente nas ciências, sobretudo no contexto das ciências físicas (ver, por exemplo, [1–10]).

Apesar disso, uma das questões que mais me inquietam no âmbito das discussões sobre as questões étnico-raciais e de gênero nas ciências e, em particular, nas ciências físicas, é o *silêncio dos homens* sobre uma das maiores evidências científicas dos últimos séculos: o *fato* de que as ciências são, em geral, racializadas, desenhadas e definidas predominantemente por meio do pensamento de homens, pessoas brancas, heterossexuais, cisgêneras (CIS-tema) e bem nascidas a diferentes latitudes do Norte e Sul Global que, por vezes, professam espiritualidades monoteístas cristãs. Entretanto, mesmo amparados por inúmeras evidências, cientistas de diferentes áreas preferem negá-las e, por vezes, as distorcem. Eu tenho cha-

mado estas pessoas de *negacionistas*¹ [6], pois, ao negarem os dados e os fatos científicos que corroboram para um perfil identitário hegemônico² e recorrente nas ciências, insistem em afirmar que estas não são identitárias. Com base em suas ideologias, cientistas negacionistas detectam *identitarismo* apenas quando

¹Nos processos de ensino-aprendizagem nas ciências físicas não há, em geral, qualquer dificuldade em classificar a astrologia e a alquimia como exemplos contundentes de pseudociências; discute-se, sem restrições, a questão dos terraplanistas e dos aficionados pela cura quântica; tampouco há cerimônia frente às questões de fé/religião (quase sempre depreciativas) e, mais recentemente, não há restrição na discussão sobre os negacionistas ligados às mudanças climáticas. No entanto, quando se trata de discutir as questões profundas em torno do racismo, do machismo/misoginia e do papel do racismo científico (pseudociência) na história das ciências, há muita resistência. Por isso denomino esses cientistas de negacionistas. Negam as evidências para o racismo, a misoginia e LGBTQIA+fobia nas ciências.

²As palavras *hegemônico* e *norma* (e suas variantes) são usadas no artigo não no sentido de reforçar os sistemas exclusão, mas para nos lembrar que elas existem e estão vivas no âmbito das categorias modernas. Não há a intenção de reforçar o poder desses grupos, mas, pelo contrário, apontá-los e questioná-los.

se trata de discutir questões ligadas ao racismo e ao gênero que não se enquadram à *norma*. Ou, alternativamente, quando essas discussões são trazidas à tona por cientistas autodeclarados negros/as, mulheres e/ou pertencentes à comunidade LGBTQIA+³. Sabemos que as ciências físicas, que tanto apreciamos e que apresentam lugar privilegiado na forma de acionar o pensamento científico moderno, têm sido *completamente identitárias*, vide o perfil hegemônico dos cientistas que já foi previamente destacado nesse texto. Esse dado contradiz a *fake news* (notícia falsa) de que as ciências são neutras, puras, ingênuas, ahistóricas, objetivas, apartadas de questões étnicas, sociais, culturais, raciais e de gênero.

Argumento que é importante que passemos a posicionar *as questões identitárias em ciências* em perspectivas mais amplas, atrelando-as às questões estruturais políticas, capitalistas, coloniais e patriarcais que demarcam as subjetividades e atravessam as instituições brasileiras, levando em conta questões profundas de história, sociologia, filosofia e antropologia da ciência. Sem esse exercício crítico e ativo do pensamento, será impossível interpretarmos de forma acurada as estruturas que nos permeiam e que garantem e distribuem, de um lado, privilégios aos perfis identitários hegemônicos e, de outro, opressão e exclusão aos corpos dissidentes das normas homogeneizadoras. É nesse sentido que advogo para a necessidade de discutirmos as lógicas que normalizam o *silêncio dos homens* para as questões de raça, gênero e classe social no Brasil.

Quero, nesse texto, dialogar especialmente com os homens que, silenciosamente, são herdeiros e defensores dos CIS-temas brancos hétero normativos. Espero trazer estes homens para essas discussões que dizem respeito essencialmente a eles, que operam a partir de múltiplas violências no âmbito do *racismo*, do *colonialismo*, do *patriarcado* e da *misoginia à brasileira*.

Muitas das questões que eu trago nesse texto estão conectadas às minhas atividades de ensino, pesquisa, extensão e divulgação em ciências na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), bem como aos trabalhos que tenho desenvolvido em colaboração com outras pessoas pesquisadoras em variadas instituições do país, de nível superior e da educação básica, em territórios negros, quilombolas e indígenas.

³Sigla para pessoas lésbicas, gays, bissexuais, travestis, trans, queer, intersex, assexuadas e outras identificações no âmbito dessa comunidade.

Parte das discussões são ampliadas e dialogadas no contexto da disciplina de graduação *Educação, Pesquisa e Divulgação das Ciências para as Relações Étnico-Raciais e de Gênero*, criada por mim em 2015 no Instituto de Física (IF) da UFRGS, com foco na formação de estudantes das ciências exatas.

Além disso, parte das discussões trazidas aqui são problematizadas no módulo *Astronomia nas Culturas e as relações étnico-raciais e de gênero nas ciências físicas* com mais de 300 estudantes matriculados semestralmente na disciplina de graduação *Explorando o Universo: dos quarks aos quasares*, no módulo criado por mim em 2021. Os estudantes são oriundos de quase todas as áreas do conhecimento da UFRGS.

As leituras feitas no âmbito da disciplina de pós-graduação *Mulheres e escritas sobre afeto, comunidade, política e pesquisa*, como parte dos meus novos estudos de doutorado na Faculdade de Educação da UFRGS, contribuíram para o diálogo com ideias que estão postas na forma como as mulheres negras se organizam em comunidades, em relações cosmológicas. Isso é feito aqui a partir de duas obras: *Ensinando comunidade: uma pedagogia da esperança*, de bell hooks [11], e *Devir quilombola: antirracismo, afeto e política nas práticas de mulheres quilombolas*, de Mariléa de Almeida [12].

E, por fim, muitas das questões que eu trago nesse texto estão atreladas às minhas experiências e vivências, questões que, espero, possam nos ajudar a questionar o *silêncio dos homens* na sociedade brasileira quando se trata de discutir o racismo, a misoginia e a LGBTQIA+fobia nas ciências físicas, negando-os, calando-se diante das evidências, mas também distorcendo as evidências em prol da manutenção de estruturas opressoras de poder.

2 Conceitos fundamentais

As ciências físicas, em seus discursos universalizantes, têm posicionado os homens brancos e hétero-cis-normativos como articuladores de sistemas superiores de dominação, em prol da maioria dos homens e de uma minoria de mulheres comprometidos com a manutenção do CIS-tema de branquitude⁴ [13].

⁴Pensado como um sistema que implica a racialização das pessoas brancas no projeto de educação das relações étnico-raciais, intimamente ligado ao racismo. Os estudos da branquitude ampliam a discussão racial no país, desuniversalizando as experiências das pessoas brancas, colocando-as como vetores importantes na estruturação e desestruturação do racismo no

No âmbito das ciências físicas, os conceitos de raça, racismo e educação das relações étnico-raciais [14], que nos interessam no presente artigo, já estão bem definidos em textos prévios ([6, 13, 15–17] e referências lá citadas). Outros textos trazem aprofundamentos teóricos sobre a definição e contextualização histórica da definição de gênero que utilizo nesse artigo [6, 8, 10, 15].

Em síntese, a raça não é tratada como um conceito biológico, pois já sabemos cientificamente, desde o Projeto Genoma, que ela não se sustenta como diferenciação genética entre as pessoas negras e não negras. A raça é interpretada como construção social, política e cultural que distribui privilégios, a matriz do racismo à brasileira, em que o fenótipo desempenha papel crucial.

O conceito de racismo não faz sentido sem a operacionalização da ideia de raça, em que as pessoas brancas são consideradas uma raça superior em relação às pessoas não brancas. É o racismo, nas múltiplas intersecções de um sofisticado sistema dinâmico, que explica o fato de que as pessoas negras estejam com frequência ocupando lugares de desvantagem nas estruturas da sociedade brasileira.

A educação das relações étnico-raciais propõe um projeto de sociedade em que as questões étnico-raciais possam ser aprofundadas e as disparidades históricas e contemporâneas entre brancos e não brancos resolvidas. Fundamentalmente, as pessoas brancas, nesses processos, precisam se ver como raça e entender que assim como há uma multiplicidade de pessoas negras no âmbito do racismo à brasileira (que é de marca) há também uma variedade de pessoas brancas. Raça, gênero e classe social se entrecruzam em vários processos que desumanizam as pessoas negras e as normalizam no *não lugar*, incluindo os espaços de protagonismo de produção do conhecimento científico e tecnológico. No bojo do racismo, a vida (e o pensamento) das pessoas negras não tem valor.

Sem generalizar, o *biscoito de gênero*⁵ traz um esquema didático de definições que perpassam os conceitos de sexo biológico, orientação sexual, identidade e expressão de gênero. Espera-se que as pessoas leitoras possam reconhecer a existência de identidades que não se encaixam nas categorias binárias do gênero masculino ou feminino, bem como se perguntar sobre a influência das normas, dos relacionamen-

tos e dos papéis de gênero sobre as diferentes orientações sexuais.

As identidades de gênero estão ligadas à química que acontece na cabeça e como esta é codificada por diferentes pessoas. As expressões de gênero estão conectadas às formas com as quais as pessoas demonstram os seus gêneros, tendo como base os papéis sociais que vivenciam, por vezes vinculados aos papéis tradicionais, mas sem deixar de tensionar as ideias canônicas de masculino e feminino, expressando-se por meios do variado espectro de possibilidades entre os extremos *masculino* e *feminino*. O sexo biológico refere-se ao órgão sexual visível. No entanto, o que é ser homem? O que é ser mulher? Para ser homem é condição suficiente ter um pênis? Para ser mulher é condição suficiente ter uma vagina? Homem e mulher são categorias que têm sido cada vez mais revisitadas na literatura. E nesses entrecruzamentos de possibilidades, a orientação sexual — a norma heterossexual, as homossexualidades e as bissexualidades — conectada à capacidade de ter, sentir ou desenvolver atração e/ou relação emocional, afetiva ou sexual por outra pessoa independente de seu sexo/gênero, entra como um marcador social da diferença delineador nas nossas relações sociais.

É importante compreender as dinâmicas dos conceitos aqui trazidos, percebendo-os como limitados no tempo e no espaço, vivenciados de formas diferentes por pessoas diferentes. Tal como acontece com a definição de ciência, esses conceitos não são estáticos e adquirem ao longo do tempo variados caminhos, interpretações e tensões possíveis, de forma que o mais importante é que as pessoas, homens em particular, se apropriem cada vez mais dessas nomenclaturas, entendendo-as nos seus contextos históricos e reconhecendo a existência de outras identidades que não se encaixam nas categorias binárias. Sem entendermos em profundidade o significado das categorias *homem*, *mulher*, *masculino* e *feminino*, e sem compreendermos a influência das normas e dos papéis de gêneros que são construídos histórica e culturalmente, será muito difícil compreendermos a multiplicidade de *masculinidades* que existem, tal qual a multiplicidade de mulheres e de feminismos, que em nada representam blocos monolíticos homogêneos. Precisamos avançar cientificamente nessa discussão, evitando perspectivas negacionistas que menosprezam as lutas históricas das pessoas colocadas à margem do seletor clube do fazer ciência e do ser cientista.

As formas com as quais as identidades de raça, gê-

Brasil. A própria forma como as ciências se movem no mundo as implicam com a branquitude.

⁵Disponível em: [MultiRio](#). Acesso em: 11 Fev. 2024.

nero e classe social se sobrepõem para explicar sistemas de opressão, discriminação, estereotipização e dominação trazem à baila o conceito de interseccionalidade [18, 19]. Além disso, os conceitos de raça e gênero ensinam a ideia de corpos-territórios-pensamentos e/ou corpos-documentos da pensadora Beatriz Nascimento (1942-1995) [20]. Esses conceitos são essenciais para nos ajudar a ecoar como as masculinidades operam nas avenidas de opressão.

Quando refletimos sobre as questões de raça, gênero e classe social no país, fundamentalmente no recorte das masculinidades, temos grandes questões a aprofundar e enfrentar, sem medo de percorrer as grandes tempestades pautadas no extermínio físico e epistêmico de pessoas negras, mulheres, indígenas, quilombolas e LGBTQIA+. Normaliza-se o fato de que majoritariamente homens/jovens negros (entre 15 e 29 anos) são mortos pelas polícias todos os dias no Brasil — um jovem negro a cada 23 minutos de acordo com os dados anuais do Atlas da Violência —, sem falar que a população carcerária é majoritariamente composta por homens negros (cerca de 65%). Enquanto isso, nas universidades e nas direções de centros de pesquisa brasileiros a presença de homens brancos é hegemônica (100% em muitos casos). Jovens pobres, negros, periféricos, quilombolas, indígenas e oriundos da comunidade LGBTQIA+ enfrentam barreiras estruturais, subjetivas, culturais e institucionais que estão muito distantes do universo de privilégios de homens *normativos*, maioria nos espaços de poder das ciências e das tecnologias. Precisamos, sem medos, cruzar as pontes entre estes mundos de opressão, nos mantendo abertos às pessoas que estão do outro lado da margem.

Há uma vasta produção literária sobre masculinidades. Elenco algumas sugestões de textos que poderão ajudar as pessoas leitoras a expandir suas ideias e a refletir sobre as masculinidades e o *silêncio dos homens* nos entrecruzamentos entre raça, gênero e classe social.

Connell e Messerschmidt [21] escreveram um clássico sobre masculinidades hegemônicas, sugerindo inclusive reformulações no conceito que segue sendo disputado na literatura corrente.

Entre outros textos marcantes, o livro *Seis balas num buraco só: a crise do masculino* [22], de João Silvério Trevisan, um dos mais importantes intelectuais brasileiros sobre as questões LGBTQIA+. No livro, João Silvério é intenso, profundo, trazendo perspectivas e com exemplos muito interessantes sobre a

crise do masculino.

Recomendo ainda a leitura do livro *Seja homem: a masculinidade desmascarada* [23], de J. J. Bola, que apresenta várias situações de expressão das masculinidades, todas elas viáveis no contexto brasileiro.

A escritora bell hooks está também entre as minhas pesquisadoras favoritas na abordagem às questões relacionadas às masculinidades negras. No livro *A gente é da hora: homens negros e masculinidades* [24], bell hooks apresenta de forma avassaladora os vários dramas e situações existenciais que transpassam as masculinidades negras.

Vale também conferir a profunda reflexão e análise histórica feita por Ivan Jablonka no seu livro *Homens justos: do patriarcado às novas masculinidades* [25]. Uma das narrativas mais completas contemporâneas sobre o assunto que eu já li.

As pesquisadoras Megg Rayara G. de Oliveira (Universidade Federal do Paraná), Letícia Carolina Nascimento (Universidade Federal do Piauí) e Jacqueline Gomes de Jesus (Instituto Federal do Rio de Janeiro) nos brindam com um livro epistemologicamente impactante, que traz as (r)existências de travestis e mulheres transexuais negras no Brasil [26]. Internacionalmente vale destacar as contribuições de Paul B. Preciado, Judith Butler, entre outras pessoas que têm pesquisado na área de gênero.

O artigo [27] traz apontamentos desestabilizadores sobre como as ideias transfeministas impactam os conceitos de interseccionalidade e feminismos contemporâneos, enquanto [28] faz uma análise indispensável do pensamento transfeminista.

Alves-Brito [6] reflete sobre a realidade das pessoas negras nas áreas de Física e Astronomia no Brasil contemporâneo, fazendo uma análise teórica e crítica destas realidades. Conceitos como ciência, tecnologia, desenvolvimento e inovação são colocados como empreendimentos de homens brancos, cujo sistema colonial, capitalista e patriarcal justifica as relações assimétricas de poder entre homens e mulheres na física e na astronomia, ciências lidas por mim como exemplos materiais de como *ações afirmativas* cumulativas ao longo da história garantem a presença massiva de homens e mulheres brancos que articulam o negacionismo racial e de gênero.

Rosa, Alves-Brito e Pinheiro [29], por sua vez, argumentam que desde que a ciência moderna e contemporânea se constituíram, pessoas negras são consideradas pseudopessoas, desumanizadas a partir das lógicas masculinas embranquecedoras das relações

entre ser, saber e poder. Na base das discussões, o conceito de necropolítica [30] e de racismo científico, ambos pensados como políticas de morte perpetradas pelo Estado e pelas instituições que o representam, conformam o ethos de homens brancos, os quais estão em grande parte ocupando os espaços de poder e à frente da elaboração e execução de necropolíticas.

As lógicas brancas, hétero-cis-normativas fazem parte das discussões realizadas por Alves-Brito [7], em um artigo emblemático que trata das cosmologias racializadas e dos processos políticos educativos antirracistas nos ensinamentos de física e astronomia.

Alves-Brito e Macedo [9] constroem, por sua vez, argumentações que nos permitem entender a importância da criação de contranarrativas sobre a história e a educação das ciências em perspectivas feministas, particularmente a partir do pensamento de Lélia Gonzalez (1935-1994). Lélia é uma das grandes pensadoras do século XXI, mas cujo pensamento é pouco difundido no meio acadêmico. Ela traz ao longo de seus escritos variadas questões sobre raça, gênero e classe social para nos ajudar a refletir sobre a construção de um outro ambiente científico. Lélia é uma das primeiras pensadoras a discutir as relações entre raça, classe social e gênero, anterior à proposição do conceito de interseccionalidade.

Na relação universidade-escola-sociedade, os meus livros (conferir minha página pessoal e outras fontes) têm trazido várias questões sobre as relações de raça, gênero e classe social nas ciências para problematizar a questão do epistemicídio e a construção das feminilidades e das masculinidades.

bell hooks, uma teórica feminista, em *Ensinando comunidade: uma pedagogia da esperança* [11] (2022), aprofunda a partir de suas vivências o impacto que a convivência com estudantes e professores negros teve na formação dela, sobretudo ao ressaltar que após mudar de escolas segregadas, em que só vivia com pessoas negras, a sua autoestima passa a ser abalada com a convivência com pessoas brancas. Nessa experiência de books, o poder da supremacia branca na dilaceração de algo que é bastante primoroso nas trajetórias de corpos dissidentes nas ciências: a autoestima. A sala de aula, a partir das ideias de hooks, deve ser um lugar de autoafirmação para pessoas negras e, por extensão, podemos incluir mulheres, LGBTQIA+, indígenas e quilombolas. A pedagogia da esperança que ela propõe, a partir das leituras do grande Paulo Freire⁶, é fundamental para a

proposição de comunidades educativas que permitam se colocar contrárias a todo tipo de opressão. Para Freire, “A luta pela esperança significa a denúncia franca, sem meias-palavras, dos desmandos, das falcatruas, das omissões. Denunciando-os, despertamos nos outros e em nós a necessidade, mas o gosto também, da esperança” [31, p. 215]. A pesquisadora bell hooks coloca a descolonização do pensamento como um caminho importante a ser trilhado para que possamos romper com as lógicas das opressões de raça, classe social e gênero, sobretudo quando se trata das realidades das pessoas negras em cada uma dessas categorias. O *silêncio dos homens*, no diálogo com a obra de hooks, fortalece o universo supremacista branco, capitalista e patriarcal que, por meio da sala de aula, constrói cosmofobias sintéticas [32], fissuras coloniais que cria barreiras de afetos. A educação antirracista, antissexista e anticapitalista é, assim, uma prática ativa de liberdade, o exercício de práticas comunitárias de resistências.

Nessa mesma direção, a leitura do livro de Mariléa de Almeida, *Devir quilombola: antirracismo, afeto e política nas práticas de mulheres quilombolas* [12], nos permite enxergar a luta antirracista, antissexista e anticapitalista por meio do pensamento da organização política de mulheres quilombolas. As questões de raça, gênero e classe social colocados na luta quilombola são, para o reexercício das masculinidades no país, também curativas, pois os movimentos sociais quilombolas são expressões contundentes da potência feminina, que se contrapõe ao *silêncio dos homens*. Tanto hooks quanto Almeida, trazem pedagogias de afeto para o tensionamento de ideias dominadoras do mundo masculino (a personificação das instituições e do Estado). O cuidado e o (auto)cuidado necessários para romper com o *silêncio dos homens*, é exemplificado no livro a partir das lutas de mulheres negras, corpos-territórios-pensamentos, que resistem e nos ensinam a edificar espaços seguros, parte de processos reconciliatórios históricos, epistemológicos e ontológicos. Almeida, lida a partir das ondas feministas, coloca-se o tempo todo a partir da ideia de que não se nasce quilombola, mas se torna, como parte dos processos de recuperação da história e conscientização do ser negro e do ser mulher negra quilom-

negras e de gênero em sua obra. bell hooks, em *Ensinando a transgredir*, nos lembra que a obra de Freire foi considerada sexista quando esta chegou, pela primeira vez, nos Estados Unidos, o que foi reconhecido pelo próprio Freire em *Pedagogia da esperança*.

⁶Paulo Freire não dá conta de forma satisfatória de questões

bola em particular.

Abdias do Nascimento (1914-2011), Ailton Krenak, Beatriz Nascimento, David Kopenawa, Fran Demétrio (1984-2021), Kabengele Munanga, Lélia Gonzalez e Nêgo Bispo (1959-2023) são pensadores importantes não apenas para a discussão racial e de gênero no país, mas também para, por meio de suas pesquisas, nos ajudar a construir outros paradigmas para as masculinidades. Fran Demétrio, em particular, é uma mulher trans/travesti negra, uma pensadora que nos deixou recentemente e que, infelizmente, por razões outras que as de costume, entrou para a triste estatística brasileira que escancara que o Brasil é o país que mais mata pessoas LGBTQIA+ no mundo, sendo que a expectativa média de vida de uma pessoa trans/travesti é de trinta e cinco anos (mais jovem para as pessoas negras) como parte das estruturas patriarcais LGBTQIA+fóbicas em vigor no Brasil. Paradoxalmente, o Brasil é o país que mais *consume* pornografia de pessoas trans no mundo (pelos homens). Esses dados revelam as artimanhas genocidas do patriarcado brasileiro.

3 A semiótica do silêncio dos homens

O documentário *O silêncio dos homens* (2019)⁷ é um dos mais didáticos projetos audiovisuais produzidos no país sobre as relações dos homens. O documentário foi produzido com base nos resultados de uma pesquisa que contou com mais de 40 mil respostas relacionadas às masculinidades. Ainda que o documentário traga questões valiosas sobre expressões de masculinidades no Brasil, eu trago para esse texto uma perspectiva complementar ao que é chamado no filme de *o silêncio dos homens*.

O Artigo Quinto da Constituição Federal do Brasil de 1988 expressa que:

Art. 5º - Todos são iguais perante a lei, sem distinção de qualquer natureza, garantindo-se aos brasileiros e aos estrangeiros residentes no País a inviolabilidade do direito à vida, à liberdade, à igualdade, à segurança e à propriedade, nos termos seguintes: I - homens e mulheres são iguais em direitos e obrigações, nos termos desta Constituição;

No entanto, sabemos que na prática isso não acontece. Mulheres são tratadas em condição de desigual-

dade em vários aspectos quando comparadas aos homens na sociedade brasileira. Sabemos (com base em evidências) que vivemos em um país racista e misógino, em que cerca de 71% dos casos de feminicídio os protagonistas são homens com elevado grau de relação íntima com as vítimas, sendo seus maridos, noivos e namorados. Beatriz Nascimento, uma das grandes pensadoras negras de todos os tempos, foi vítima de um feminicídio, tendo o namorado branco de sua amiga como seu algoz. Quando foi morta, Beatriz defendia a amiga de ataques misóginos. Muitas das meninas/mulheres que são estupradas no Brasil têm os homens próximos a elas como os protagonistas dos crimes. Jovens negros (entre 15 e 29 anos) são preferencialmente assassinados no país por forças masculinas de segurança. Além disso, vivemos, como já previamente enfatizado, em um país LGBTQIA+fóbico, em que as pessoas LGBTQIA+ são mortas por ser quem são, tendo homens majoritariamente como os seus algozes.

Esses dados não nos deixam perder de vista a verdade inconveniente e silenciada de que examinar as questões de raça, gênero e classe social na física e na astronomia e nas nossas relações sociais é nomeadamente ponderar a presença masculina como vetor e operador de violências contra pessoas negras, mulheres, indígenas, quilombolas e LGBTQIA+. Vivemos em um país machista, misógino, classista e altamente desigual que opera violências estruturantes da nossa realidade, na educação básica, nas universidades, nos espaços científicos e nas nossas teias sociais e culturais. Os homens hétero-cis-normativos estão na base dos projetos de violência em que estes não apenas matam, mas também se matam. Esses homens são protagonistas das violências de gênero, ainda que neguem pertencer a essa categoria ou à categoria de raça. Gozam de lugares de privilégio de raça e gênero. Essa verdade inconveniente deveria incomodar os homens, levando-os ao desenvolvimento de múltiplas responsabilidades e estratégias de (auto)cuidado. Quando eu abordo a categoria gênero em meus movimentos como educador e divulgador de ciências, quase sempre dialogo com mulheres ou com homens dissidentes da *norma*. Mas não podemos naturalizar e nem perder de vista, um só segundo, que todas essas estruturas mortíferas, materiais, físicas ou simbólicas, têm os homens (e os seus aliados) significativamente como protagonistas.

O documentário *o silêncio dos homens*, bem como os livros e artigos previamente elencados, apontam

⁷Disponível em: [YouTube](#). Acesso em: 27 Dez. 2023.

as características mais importantes que estão atreladas ao jeito de *ser homem* no Brasil e fora dele, que (co)(per)formam o que eu estou aqui denominando de a *semiótica do silêncio*: competição; agressividade; virilidade; o macho alfa que está atrelado nas ciências à transferência da ideia de que os homens são dotados de uma inteligência superior; homens não podem chorar; fraqueza; vulnerabilidade que não é colocada, que não é dita; incapacidade de comunicação; altas taxas de suicídio entre os homens; o medo sempre latente de não ser competente; o fato de que os homens interrompem e falam o tempo todo; a problemática do autocuidado; a expressão contínua dos homens como seres ativos, dominadores, exatamente para fazer jus à virilidade como uma poderosa habilidade; a questão da depressão e de outras doenças psíquicas que perpassam as existências dos homens que atuam na lógica da dominação. Para além destes, a materialização da razão e do senso mais profundo de humanidade; o poder.

Em síntese, cada uma dessas questões são vivenciadas muitas vezes em silêncio e, conseqüentemente, transbordam violências. São essas violências que, em última análise, explicam as dinâmicas dos quadros estruturantes que vão repercutir nas nossas relações sociais, nos laboratórios de física e astronomia, nas salas de aula, nas nossas relações do dia a dia, operados por masculinidades que pouco se pensam como homens privilegiados que decidem quem vive e quem morre, em pactos narcísicos [13] e táticas da *broderagem*. As questões previamente sintetizadas como a *semiótica do silêncio*, a não discussão, o não engajamento, bem como a reafirmação das responsabilidades perante os seus afetos e o seu jeito de ser e de viver respeitando humanos e não humanos sintetizam a expressão *o silêncio dos homens*. Nessa expressão, não apenas reafirmo a mensagem latente trazida pelo documentário de que os homens precisam se entender e dar conta dos seus sentimentos e de suas subjetividades, mas também proponho o aprofundamento, entre os homens, das questões étnico-raciais e de gênero no sentido de que o *silêncio* consciente (a negação e a distorção de evidências científicas sobre questões de raça, gênero e classe social) é o responsável pela *máscara do silenciamento* [33] e do extermínio físico e epistêmico da *outridade* que é diferente dos homens privilegiados e medrosos. Ou seja, quando nós estamos discutindo as questões fundamentais para desestruturar e romper com o racismo, o sexismo, o machismo e a LGBTQIA+fobia, nós precisamos que es-

ses homens (em seus *clubes científicos do bolinha*) rompam com essas máscaras de silenciamento, que insistem em silenciar as mulheres e outros gêneros dissidentes da norma. Esses homens não são apenas CPF (pessoa física; subjetividades), mas também constituem CNPJ (instituições; subjetividades coletivas). Precisamos de homens e *cientistas homens* atuantes, comprometidos com a transformação social, racial e de gênero e, mais do que nunca, educados por ideias e teorias feministas, transfeministas e de outros movimentos sociais que surgiram para combater desigualdades históricas protagonizadas por homens que se pensam universais, que não se lêem a partir das categorias gênero, raça ou classe social.

O que podem esses homens fazer? Como podem atuar diretamente em processos emancipadores de sociedades? Como é que os homens devem se mover rumo a outros contratos sociais de coexistências com as mulheres e com outros corpos considerados *femininos*, ameaçadores da norma patriarcal? Como os homens podem atuar para modificar as estruturas genocidas que criaram em torno das categorias raça/gênero/classe social?

Numa interpretação de *Memórias da plantação* [33] da multiartista e pesquisadora Grada Kilomba, eu diria que para rompermos com as máscaras materiais e simbólicas do silenciamento não é suficiente apenas darmos conta daquilo que nos silencia o tempo inteiro; é fundamental criarmos as estratégias para responder à pergunta sobre o que é que podemos fazer, individual e coletivamente, especialmente a partir da punção masculina que move o mundo, para ouvir e agir em prol das pessoas que têm sido silenciadas, preteridas, esquecidas, sabotadas na história da ciência.

Os homens precisam (re)pensar as suas masculinidades a partir dos fundamentos prático-teóricos dos arcabouços feministas e transfeministas, em que feminismos, masculinidades, branquitude e negritude acontecem nas relações entre pessoas que são diferentes e que, por isso, precisam ser respeitadas e reconhecidas em sua dignidade humana. Precisaremos desenvolver mais projetos de educação para as relações étnico-raciais, sem perder de vista as questões de gênero, no contexto das masculinidades. A cisgenderidade precisa ser questionada em sua forma universalizante de interpretar o mundo. É também nessa dimensão que compreendemos que os feminismos têm uma razão de ser, pois precisam vencer o sistema de opressão que é protagonizado por homens

e, ao mesmo tempo, também ampliar as suas lentes para questões contemporâneas colocadas, como as questões trans/travestis. É nesse sentido que precisamos avaliar as masculinidades, dialogando o tempo inteiro com os múltiplos significados e os agenciamentos dos (trans)feminismos. Isso nos leva a elaborar a *semiótica do silêncio dos homens* a partir da ideia latente de distopia brasileira que, por sua vez, tem os homens (CIS-temas brancos) como protagonistas das violências materiais e simbólicas contra as mulheres, as pessoas negras, indígenas e a comunidade LGBTQIA+. Não se trata apenas de ser, os homens, aliados das mulheres nas lutas feministas, mas é sobre como eles podem fazer a sua própria viagem subjetiva para transformar a porção violenta do masculino que vive em si. No rompimento efetivo do silêncio, os homens precisam desarticular essas estruturas, acionando as ações individuais e institucionais para dar conta do *masculino violento* e construir uma outra perspectiva de masculinidade. Nesse sentido, as mulheres não têm como individualmente, até mesmo como parte de suas teias familiares e de convívio social, ensinar os homens como desfazer os nós das violências em suas multidimensionalidades. As mulheres não têm, dentre tantas outras responsabilidades, o dever de ensinar os homens a como não ser machistas e misóginos ou como não proceder, nas relações interpessoais e profissionais, a partir dos fundamentos do patriarcado e do racismo. Alternativamente, na experiência coletiva de resistência frente à dominação masculina racista em todas as esferas da existência, desde que o mundo é mundo, as mulheres têm ensinado aos homens por meio dos feminismos e dos transfeminismos negros e não negros. Por meio de suas lutas históricas organizadas, as mulheres têm acionado tecnologias sociais, culturais e políticas importantes para ajudar os homens em seus processos de cura pela extirpação das violências seculares impostas pelo racismo e patriarcado. Estão os homens dispostos a fazerem outros deslocamentos epistemológicos e afetivos na contramão das normas destruidoras?

Nesses processos educativos e des(formativos), práticas de não dominação como o respeito, a promoção da igualdade e da equidade (como lidamos com cada uma delas?) precisam fazer parte do *ser* homem. A ética do cuidado precisa, para ser eficiente, nos entregar as ferramentas que nos permitam repensar o *ser* masculino. Além disso, é preciso investir na promoção de ações subversivas que nos permitam

reconfigurar os patriarcados e, uma vez mais, fortalecer as perspectivas relacionais, para além das barreiras impostas pelas binaridades plasmadas no projeto moderno e contemporâneo de sociedade. Isso precisa ser feito não apenas nos micromundos e nas micropolíticas, mas em escalas cósmicas para que possamos coabitar e coexistir em espaços de habitabilidade orgânica [25, 26, 32].

Nesse caminhar por outras estruturas epistemológicas e ontológicas afetivas, é preciso desenvolver na comunidade científica a noção orgânica e contracolonial [32] de que os homens não precisam exterminar as mulheres (e os demais corpos dissidentes de gênero, raça e classe social) do ambiente científico para se sentirem superiores ou mais capazes. As pessoas negras e indígenas tampouco precisam ser exterminadas do ambiente acadêmico para que estes sigam sendo os espaços seguros, tranquilos e meritocráticos da branquitude alienada.

Temos, nesse sentido, uma questão histórico-filosófica pertinente, uma questão cosmológica associada a um confronto: de um lado nós temos o conceito de liberdade, que é o que as mulheres, indígenas, pessoas negras e LGBTQIA+querem; elas querem ser livres para pensar, agir, tomar decisões, ser o que quiserem, atuar como quiserem, chegar e ocupar os espaços de poder. Por outro lado, nós temos os homens privilegiados que precisam o tempo inteiro articular o senso de justiça. Não há como as mulheres (e os corpos dissidentes de raça e gênero) alcançarem liberdade no âmbito do sistema de dominação se os homens não se verem no lugar ético do *ser* homem. É nesse sentido que todas as pessoas comprometidas com práticas democráticas precisam promover espaços e ambientes científicos, educativos e culturais muito mais inclusivos e afetivos, mais receptivos à coexistência de pessoas com deficiências, mulheres, LGBTQIA+, negros(as), indígenas, quilombolas e demais pessoas que foram historicamente retiradas do projeto moderno e contemporâneo de ciências (físicas). É obviamente que esses movimentos não são fáceis, porque eles lidam com confrontos internos e externos, enraizados no imaginário social coletivo, altamente racista e sexista, de ordem colonial e patriarcal capitalista.

A ordem de dominação masculina, como parte fundante do nosso processo colonial, subjuga mulheres, pessoas indígenas, LGBTQIA+ e negras, de forma que precisaremos sempre revisitar as cartografias sociais de um outro jeito, reforçando as potências epis-

têmicas dos grupos historicamente subalternizados. A partir do momento que essas potências epistêmicas são reconhecidas e valorizadas, o universo científico torna-se mais interessante para todas as pessoas. No entanto, é importante não esquecer que há uma questão histórica que fundamenta a exclusão como uma estratégia vibrante do projeto de ciência construído na modernidade. Essas estruturas de exclusão de ordem masculina são tão enraizadas que, por vezes, pensamos em desistir de lutar pela transformação, julgando que não estamos fazendo o suficiente. Por isso é tão importante a força dos coletivos, aldeamentos e aquilombamentos epistêmicos. Os homens, em particular, seguem desorganizados politicamente (no sentido mais profundo da palavra) e, quando organizados, estão pactuados com o *silêncio* e o *silenciamento dos corpos* não deveriam existir a partir das lógicas coloniais e patriarcais dominadoras que estes homens normativos defendem e geram as engrenagens. É importante que os homens criem seus próprios coletivos para refletir e aprofundar as questões que perpassam suas masculinidades opressoras e violentas (ou reprimidas) e, ao mesmo tempo, possam criar espaços de exercício de seus afetos, entendendo-se, sem rancor e revanche, o seu lugar de protagonista de violências contra mulheres, negros, indígenas e LGBTQIA+.

As ciências modernas e contemporâneas têm construído imaginários perversos sobre as relações entre continentes e povos, homens e mulheres, reforçando sempre a ideia de classificação a partir de uma lógica binária. O *silenciamento dos homens* não permite reconhecer o poder destruidor do sistema colonial, capitalista e patriarcal no estabelecimento dos marcadores sociais da diferença e de suas dinâmicas em relação às questões étnico-raciais, de classe, gênero, origem geográfica, sotaque, sexualidade, orientação sexual e identidade de gênero. Não se constroem chaves de pensamento que permitam compreender as relações entre esses diferentes marcadores sociais e os sistemas globais de dominação (de ordem masculina marcadamente) e como feminismos, masculinidades, branquitude e negritude se encontram nas avenidas de opressão.

Maria Cida Bento, citada anteriormente, é uma exímia pesquisadora negra altamente empenhada junto com toda a equipe do Centro de Estudos das Relações de Trabalho e Desigualdades (CEERT, criado em 1990) no combate ao racismo em suas estruturas no país, sem perder de vista a relação do racismo com

outros marcadores sociais. Quando Cida Bento traz para nós a ideia do *pacto narcísico da branquitude* ela reposiciona a branquitude como uma identidade perversa que classifica o outro (negros, indígenas, mulheres, LGBTQIA+, quilombolas), mas que é incapaz de se colocar no lugar privilegiado de dominação e de exclusão, e de reconhecer como alimenta e retroalimenta os mecanismos das masculinidades normativas, engrenagens importantes no jogo das violências que nos cruzam.

Para Connell; Messerschmidt (2013):

O conceito de masculinidade hegemônica formulado há duas décadas influenciou consideravelmente o pensamento atual sobre homens, gênero e hierarquia social.² Esse conceito possibilitou uma ligação entre o campo em crescimento dos estudos sobre homens (também conhecidos como estudos de masculinidade e estudos críticos dos homens), ansiedades populares sobre homens e meninos, posição feminista sobre o patriarcado e modelos sociais de gênero. Encontrou uso em campos aplicados que variam desde a educação ao trabalho antiviolação até a saúde e o aconselhamento. [21, p. 241].

Frantz Fanon (1925-1961) [34] nos apresenta ensinamentos cruciais para tensionarmos as masculinidades em suas construções subjetivas, fundamentalmente sobre como é que podemos lidar com a subjetividade quando pensamos a linguagem, as relações entre mulheres e homens.

Precisaremos, em todas as áreas do conhecimento, nos aprofundarmos sobre as questões práticas e teóricas que as pessoas trans/travestis têm nos trazido [26]. Se não compreendemos que os corpos trans/travestis são violentados desde muito cedo pelas diferentes teias sociais (família, escola e trabalho) não compreenderemos as suas ausências nas carreiras científicas e as naturalizaremos. Será preciso aprofundarmos nossas reflexões sobre violência obstétrica, autonomia reprodutiva, gravidez paterna, estupro, aborto e o recente debate no país, envolvendo feministas negras relevantes para a luta antirracista, em torno do uso do termo *pessoas que menstruam* no lugar ou ao lado de *mulheres que menstruam*. Há, nessas discussões, aprofundamentos sobre a construção das masculinidades e das lógicas machistas e misóginas que não somente estruturam a forma de es-

tar no mundo dos homens, mas de todas as pessoas que não se posicionam intelectual e sensivelmente contrárias às ordens de dominação das masculinidades hegemônicas. Precisaremos avançar na melhoria do atendimento (em todos os sentidos) às populações LGBTQIA+, e das pessoas trans/travestis, seja na integralidade e equidade dos serviços e ações, seja na humanização e no acolhimento nos ambientes escolares e acadêmicos. A formação inicial e continuada dos profissionais da educação, em todas as áreas, precisam ser feitas em perspectivas antirracistas, (trans)feministas e descolonizadoras, humanizando os seus processos.

Os homens, portanto, precisam entender o que são os feminismos, os transfeminismos e como as masculinidades se relacionam (e incidem) com essas vertentes de pensamentos e de organização social comunitária. Os homens, primariamente os hegemônicos, precisam romper com o silenciamento combinado e entender o que as mulheres e homens trans, as pessoas não binárias e as travestis estão discutindo e propondo epistemologicamente como formas outras de bem-viver. É preciso romper com o *silêncio ensurdecidor*. Não podemos mais seguir fazendo de conta que essas pessoas não existem e que não têm o direito de chegar e ocupar espaços acadêmicos e científicos que têm sido, como já dito anteriormente, reservados para os mesmos corpos normativos de sempre. As salas de aulas nas universidades em carreiras das ciências físicas ainda não são diversas como gostaríamos. As conferências e os lugares de decisão são ainda tomados pelos mesmos corpos de sempre, e nem precisamos de estatísticas elaboradas para constatar esses fatos. Basta apenas colocarmos em prática o método estatístico *de virar a cabeça e olhar para o lado*, e constataremos o quanto os ambientes científicos são ainda lugares pouco diversos, monocromáticos. Argumento que o silêncio constrangedor em torno da naturalização dessas ausências é parte fundante da estrutura colonial, capitalista e patriarcal que performa a construção da ciência moderna e contemporânea, tendo a dominação masculina branco-racista e hétero-cis-normativa como uma de suas mais poderosas tecnologias, que sequestrou o ser, o saber, o poder e o sentir. Não podemos perder de vista o papel da dominação masculina ao conectar colonialidade e escravidão.

As dimensões do ser, saber, poder e sentir trazem para nós, na física e na astronomia, a questão do prestígio intelectual. Quando a física e a astronomia fa-

zem perguntas fundamentais sobre como o Universo se formou e evoluiu, elas colocam sobre si um capital simbólico muito valioso. Só que esse capital simbólico e prestígio intelectual estão costurados e amparados no projeto colonial, capitalista e patriarcal moderno, que é excludente, vinculado ao domínio dos homens e das masculinidades brancas hétero-cis-normativas. É nesse sentido que precisaremos, em comunidade, minar, criar fissuras, hackear esse sistema que tem sido extremamente excludente e injusto.

O *silêncio dos homens* implica, portanto, que olhe-mos para esses dados por meio de outras lentes intelectuais, sem articular ideias negacionistas quando se trata de reconhecer o quanto a dominação masculina tem sido limitante, excluindo grande parte dos cérebros que poderiam inovar e fazer a ciência avançar de formas ainda não imaginadas e vivenciadas como consequência do extermínio físico e epistêmico em curso.

Precisamos advogar por uma nova ordem — e nem se trata de sair de um polo de dominação masculina para o de dominação feminina/transfeminista — é pelo menos reconhecer, no presente, que não se trata apenas de *mi-mi-mi* das mulheres, das pessoas negras e LGBTQIA+. É realmente se confrontar com os dados, por meio do pensamento crítico, e não com base nas próprias ideologias negacionistas.

Como mostra a Figura 1, o sistema de pós-graduação no Brasil é dominado por homens brancos, seguido por mulheres brancas. Homens negros e mulheres negras estão subrepresentados. A participação das mulheres pretas é ínfima no programa de pós-graduação brasileiro. Esse silêncio e silenciamento precisam ser rompidos pelos homens (e mulheres), essencialmente os que estão ocupando os lugares de poder, as agências fundamentais, as sociedades científicas; pelos que estão tomando decisões, ensinando nas universidades, construindo currículos e propondo políticas de ciência, tecnologia e divulgação científica.

É impossível olhar para a Figura 1 e não repercutir o injusto sistema de contratação de professores nas universidades e de oportunidades acadêmicas (bolsas de produtividade, viagens, estágios, coordenação de grandes projetos e colaborações internacionais, premiações recebidas, etc) que não garantem a distribuição das oportunidades nos grupos dissidentes.

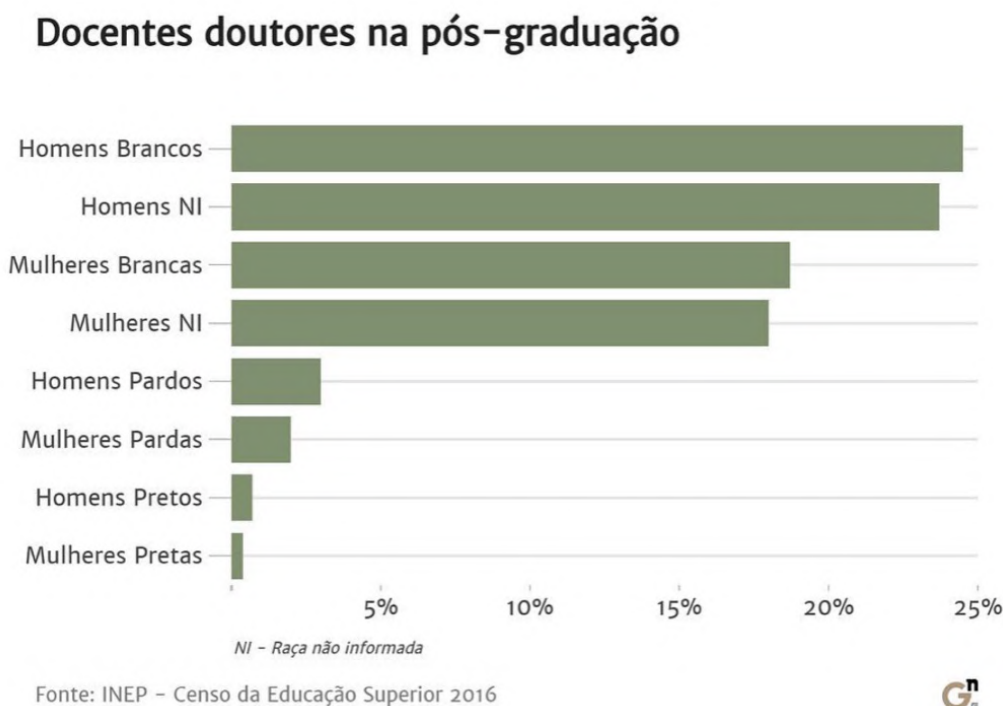


Figura 1: Distribuição de docentes, por perfil racial, no sistema de pós-graduação do Brasil. Dados públicos.

4 As masculinidades e as ondas feministas

Os conceitos de branquitude, epistemicídio [35] e interseccionalidade nos ajudam a compreender de que maneira a ciência moderna tem construído a separação entre sujeito e objeto, denominação essa que já deveria ser transpassada. Sujeitos são sempre os homens, enquanto os objetos são as mulheres; sujeitos são as pessoas cis, enquanto objetos são as pessoas trans/travestis; sujeitos são as pessoas brancas, enquanto as pessoas negras são objetos. Os movimentos feministas ao longo de séculos têm nos ajudado a reposicionar as lógicas sujeito/objeto. Da mesma forma podemos ponderar os movimentos sociais negros, indígenas e LGBTQIA+, vistos como movimentos educadores que trazem perspectivas epistemológicas distintas e inovadoras. Esses movimentos têm nos trazido conhecimentos novos sobre práticas, metodologias e epistemes. Sabemos, portanto, onde estão as fontes. Precisamos nos mover, ler, conhecer, aprofundar, sair da condição de inércia e partir para a luta e ação; ir para as comunidades, para as periferias e para as escolas. Nós, professores, precisamos transformar as nossas salas de aula. Temos aparato referencial didático, pedagógico e epistemológico para fazê-lo. Não o fazemos porque preferimos compactuar com o *silêncio dos ho-*

mens brancos hetero-cis-normativos e com o *silenciamento dos corpos dissidentes*, desestimulando os protagonistas da transformação e estimulando as pessoas que seguem capitalizando os seus próprios privilégios.

Os movimentos sociais feministas, indígenas, negros e LGBTQIA+ trazem o conceito de biopoder de Michael Foucault (1926-1984) para o cerne de suas discussões, conceito este que estrutura a ideia de necropolítica [30]. Argumento, assim, que as ondas feministas [15] devem/podem ser processos curativos para as masculinidades.

Ainda que seja difícil precisar as datas de começo/fim das ondas feministas, mesmo por que muitas delas acontecem concomitantemente, de forma didática situamos a *Primeira Onda Feminista* do final do século 19 até o início do século 20. Nesse período, temos sobretudo as mulheres brancas organizadas pelo sufrágio, derrubando obstáculos na questão do direito ao trabalho, ao voto e à propriedade. Mas vale destacar que essas mulheres brancas estavam preservadas das estruturas colonizadoras escravagistas.

O discurso emblemático de Sojourner Truth⁸ questiona, no século 19, tendo como base o tratamento

⁸Disponível em: [Geledes](#). Acesso em: 30 Dez. 2023.

dispensado na sociedade da época às mulheres brancas, se por acaso não era ela uma mulher, que já trabalhava muito antes das mulheres brancas irem para as ruas lutar pelo direito ao trabalho. O útero de Truth, como parte das lógicas masculinas coloniais racistas, já tinha sido sequestrado pelos sistemas de opressão para a *produção* de homens e mulheres negras que pudessem servir de mão de obra ao capitalismo *plantation*.

A *Primeira Onda Feminista* traz para as ciências a sub-representação das mulheres cientistas e a forma desigual com que elas foram tratadas nas ciências da época, como por exemplo ilustra o caso marcante das mulheres computadores de Harvard. Temos, como exemplo das relações desiguais de gênero, o caso estrondoso da Cecília Payne (1900-1979), uma das grandes cientistas do tempo dela, cuja tese de doutorado é considerada entre as mais importantes de todos os tempos nas ciências físicas. Payne, conforme relatado em detalhes em [8], enfrentou questões de poder envolvendo o prestígio de Norris Russell (1877-1957), um dos construtores do famoso Diagrama Hertzsprung-Russell (HR). É bem documentado na literatura as formas utilizadas por Norris Russell para manipular os resultados da pesquisa de Payne que confrontavam as ideias científicas de Russell sobre a evolução estelar.

A *Segunda Onda Feminista* situada historicamente mais ou menos dos anos cinquenta aos anos oitenta do século 20, tem momento marcante com a publicação do livro *O segundo sexo* de Simone de Beauvoir. Bem conhecida no mundo acadêmico, Beauvoir enfrentou forte reação machista ao longo de sua carreira. A sua proposição de que *não se nasce mulher, mas se torna mulher*, é uma contribuição original para os estudos feministas. Simone de Beauvoir é considerada umas das grandes filósofas e feministas de todos os tempos. A *Segunda Onda Feminista* é marcante porque amplia o debate da questão de sexualidade, do papel da família e do mercado de trabalho para as mulheres. Para as ciências, a perspectiva cultural do *tornar-se* mulher traz contribuições ímpares para as questões de natureza da ciência, de forma que a ciência produzida ao longo da segunda metade do século 20, adentrando o século 21, foi/é certamente influenciada pela ideia do tornar-se mulher, o que coloca as questões culturais no centro do debate: quais são as práticas científicas que estão colocadas? Quais são os métodos e as epistemes que definem o que é ciência e como ela funciona? E qual é o papel das

mulheres nessas definições?

Na esteira da *Segunda Onda Feminista*, destaco o Efeito Matilda, cunhado somente em 1993 pela socióloga Maria Elina Estébanez. O Efeito Matilda designa os fenômenos sociais que minimizam a contribuição das mulheres nos campos das ciências e das tecnologias em detrimento aos homens, em todas as esferas históricas das relações sociais e institucionais. Como parte do projeto de dominação masculina e do *silêncio dos homens*, em 1967 a astrofísica Jocelyn Burnell descobriu os pulsares, mas somente o seu orientador de doutorado teve o reconhecimento pela descoberta, ganhando anos mais tarde, em 1978, o Prêmio Nobel de Física. O Efeito Matilda e o *tornar-se mulher cientista* frente às barreiras impostas pelo patriarcado explicam o fato vivido pela cientista descobridora dos pulsares, ou seja, não como um dado biológico, mas como parte das nossas construções sociais e políticas. O número de mulheres, principalmente mulheres nas ciências físicas, a terem ganhado o Prêmio Nobel é assustadoramente ínfimo (nenhuma negra), o que reafirma que esse fato é consequência das construções machistas e misóginas construídas ao longo da história da ciência que impedem as mulheres de serem reconhecidas por suas contribuições às ciências.

Por que os homens que ganharam historicamente o Prêmio Nobel (e outros prêmios científicos) se calam frente a uma realidade tão excludente? O silenciamento não é só individual, mas também comunitário, em acordos de *broderagem*. Eles são grandes entraves nos avanços de políticas radicais de combate à exclusão de tudo que se aproxime do *feminino* nas ciências.

A *Terceira Onda Feminista* surge nos anos 1980/90 quando as mulheres brancas hétero-cis-normativas são questionadas sobre as ausências, na agenda feminista, das questões específicas das mulheres negras e de parte da comunidade LGBTQIA+ (ainda que a sopa de letras à época fosse menos inclusiva). As questões de raça, gênero e classe social já adiantadas por Sojourner Truth são assim retomadas, em proporções mais radicais.

A *Quarta Onda Feminista*, em curso, está ligada aos movimentos organizados das mulheres nas redes e mídias sociais e digitais, ferramentas importantes para que mulheres e homens trans se coloquem, bem como mulheres quilombolas e indígenas, não somente no Brasil mas nas lutas políticas das mulheres no mundo, contra os Estados violadores de direitos

a partir das lógicas violentas expressas por meio de masculinidades seletivas. Como, então, no meio de tudo isso, romper com o silêncio e a *broderagem* dos homens em posições de poder? Como criar estratégias e políticas institucionais capazes de barrar o assédio sexual e moral ainda recorrentes nos ambientes das ciências físicas?

Argumento que as quatro ondas feministas são curativas para os homens, porque elas não apenas denunciam o conjunto de opressões orquestradas pelos homens sobre as mulheres, mas também apontam caminhos de reparação histórica e responsabilização no presente, ou seja, processos educativos emancipatórios. As quatro ondas feministas são estratégias pedagógicas necessárias para transformar as realidades patriarcais que nos franqueiam, desnaturalizando opressões históricas não biológicas, que não são dadas de nascença ou geneticamente herdadas. As quatro ondas feministas reafirmam o caráter de construção social e política, sem tréguas, de combate ao projeto de dominação masculina (Figura 2) que pouco questionamos, porque aprendemos a aceitar esse lugar de desigualdade, de opressão contumaz. Às mulheres, resta apenas não desistir e transpassar, com ou sem os homens aliados, os assédios sexuais e morais cotidianos nos ambientes de trabalho; as questões dos papéis sociais e desiguais de gênero; a falta de modelos a serem seguidos; as responsabilidades familiares como obrigação única das mulheres; os baixos salários quando comparados aos dos homens pela mesma função; e as opressões perpetradas no âmbito da maternidade, em que sempre são as mulheres a sacrificarem as suas carreiras em nome da maternidade, tratada pelo patriarcado como uma expressão máxima da dominação masculina sobre os corpos das mulheres.

Em síntese, são numerosas as barreiras colocadas para as mulheres por velhos sistemas patriarcais que contam diariamente com o *silêncio dos homens*, ou seja, com o pacto renovado e celebrado das masculinidades opressoras. As ondas feministas não são meras ondas. Elas são, por todo o seu poder energético acumulado de transformação, tsunamis, compostos por ondas gigantes em interferência construtiva, que penetram o tempo e o espaço.

Os feminismos não são as únicas possibilidades de questionamentos das relações de gênero no mundo mas, certamente, com seus erros e acertos, têm sido poderosos movimentos coletivos que têm ajudado a reverberar as vozes das mulheres no mundo e a re-

posicionar a agenda global nos mais variados setores. Nas ciências, os movimentos feministas têm trazido grandes contribuições, rediscutindo as lógicas teóricas, experimentais e observacionais pautadas em princípios de exclusão.

5 Assédios e dominação masculina nas ciências físicas

O projeto de extensão Meninas na Ciência, do IF/UFRGS, realizou anos atrás duas campanhas em que registraram as falas de estudantes (*Esse é o meu colega*) e professores (*Esse é o meu professor*) sobre a presença das mulheres nos cursos de graduação em física⁹. As frases são estarrecedoras e, abaixo, destaco algumas:

- *Ciência não é coisa de mulher.*
- *Tem trinta anos, dois filhos pra criar e ainda tem coragem de viver de bolsa.*
- *Mulher não era pra estar aqui. Era pra estar lavando a louça.*
- *Mulher gosta de apanhar.*
- *Até que para uma mulher você entende muito de matemática.*
- *Cólica é desculpa de preguiçosa.*
- *Vai fazer mestrado em outra cidade? O que seu marido acha disso?*
- *Eu preciso de dois mestrandos, um cara inteligente e uma gurria bonitinha.*
- *Turing é a mãe da ciência da computação.*
- *Se depender de mim você não se forma.*
- *Licenciatura é curso para mulher que não passa nas cadeiras do bacharel.*
- *Não adianta mostrar os peitos que eu não vou dar nota.*
- *A mulher tem que dar para o chefe, para subir de cargo.*
- *Mulher só entra na faculdade pra arranjar marido.*

⁹Disponível em: [Meninas na Ciência](#). Acesso em: 31 Dez. 2023.

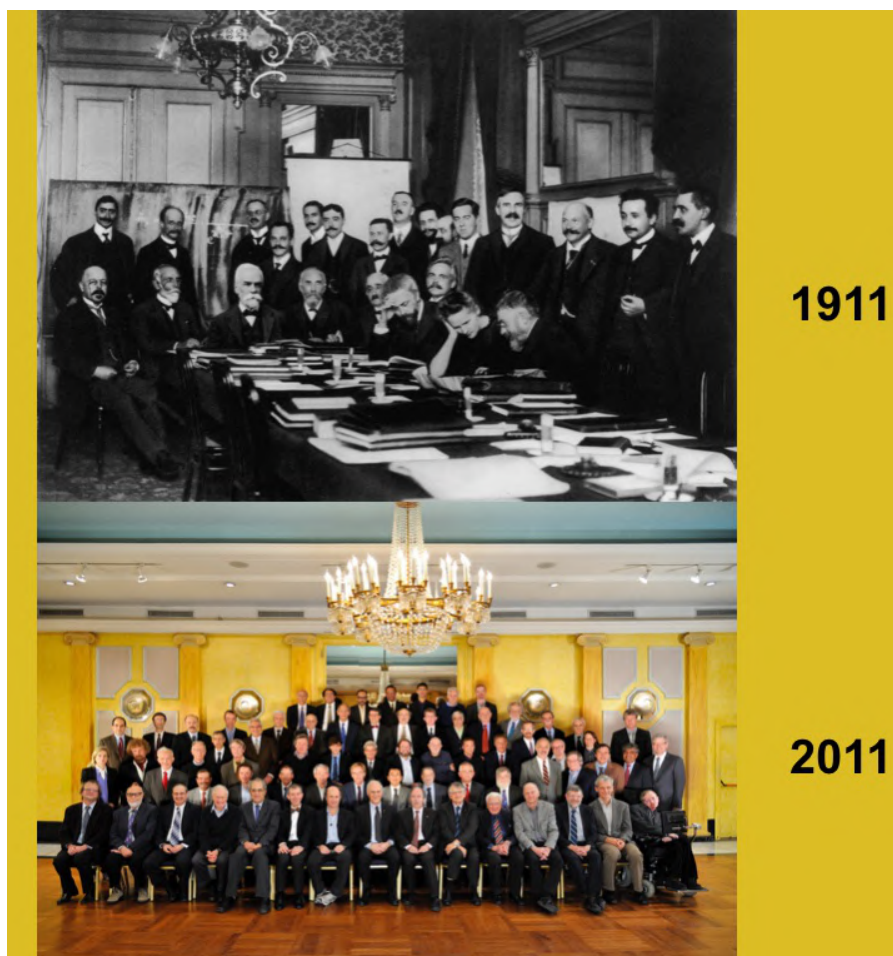


Figura 2: Subrepresentação de pessoas negras, mulheres, LGBTQIA+, indígenas e quilombolas em um dos mais importantes congressos da área de física e química em 100 anos. Imagens públicas.

- *Achei que as mulheres não fossem conseguir realizar essa atividade.*

As falas acima destacadas não deixam dúvidas sobre os processos materiais e simbólicos de violência das experiências das mulheres na física, tendo os homens como protagonistas das violências.

Há outros casos graves nacionais e internacionais, mas muitos deles abafados pelas próprias instituições (colegas) com base no pacto do *silêncio dos homens*¹⁰, por vezes com o auspício de mulheres, muitas delas sem qualquer leitura crítica dos movimentos históricos feministas e raciais.

No caso da Astronomia, há um episódio emblemático em que uma estudante de pós-graduação foi assediada sexual e moralmente pelo orientador, tendo inclusive que se mudar de instituição (deslocou-se do nordeste para o sudeste e de lá para o sul)¹¹. Após

¹⁰Disponível em [Folha](#). Acesso em: 28 Dez. 2023.

¹¹Disponível em: [UOL](#). Acesso em: 31 Dez. 2023.

anos de estresse e desconforto para a pessoa assediada, tendo o caso sido investigado pela Polícia Federal, o desfecho não foi nada agradável, o que demonstra o peso das relações assimétricas de poder. A estudante teve que lidar sozinha com os seus traumas. Algum tempo depois, o assediador foi indicado pelos próprios pares (homens e mulheres) para compor a Academia Brasileira de Ciências (ABC). Fazer parte da ABC foi o seu prêmio de consolo. Os pares que fizeram a indicação sabiam dos fatos envolvendo o assediador e a então estudante de doutorado. Esse exemplo materializa bem o que venho chamando ao longo do texto de o *silêncio e a broderagem dos homens*, apoiados muitas vezes por mulheres alheias às discussões de raça, classe social e gênero, defensores da meritocracia.

Nos últimos anos assistimos atônitos quatro casos que também materializam em esfera internacional como o *silêncio dos homens* se expressa por meio da

dominação masculina (assédio sexual e/ou moral)¹².

O primeiro aspecto importante a ser notado é que as notícias foram estampadas e os casos muito bem discutidos em jornais de prestígio como *Nature* e *Science*. Além disso, as pessoas envolvidas gozavam de grande prestígio intelectual (capital cultural) a partir de suas instituições famosas, alicerçadas no projeto de dominação masculina do mundo. Outro aspecto interessante é que temos, entre os quatro casos, uma mulher e três homens sendo acusados, enquanto um dos homens é negro. Isso demonstra que as questões de raça, gênero e classe social interseccionadas precisam de fato ser refletidas com cuidado. Por muito tempo, as mulheres negras não tinham espaço nos Movimentos Sociais Negros para colocar as suas ideias, como parte da agenda de dominação masculina (machismo) que não levavam em conta as questões das mulheres. Essas mesmas questões, conforme já destacado ao longo do texto, estão postas para as experiências no âmbito de outros movimentos sociais, sobretudo as pessoas LGBTQIA+. As demandas das mulheres negras não eram tampouco compreendidas nos movimentos feministas brancos e tampouco nos movimentos negros masculinos.

Outro aspecto que para mim é relevante é pensar como os vários homens do Instituto Max Planck para Astrofísica (MPA), na Alemanha, foram poupados de escândalos como estes protagonizados por Guinevere Kauffmann. Eu mesmo tive a oportunidade de visitar por vários meses o MPA e testemunhei diferentes momentos em que a linha do respeito e da integridade do debate científico foi ultrapassada. Sem contar que muitos jovens pesquisadores comentavam nos corredores sobre como os orientadores/supervisores se comportavam com os seus orientandos/supervisionados. Os orientadores eram chamados, ironicamente, de PhDeuses. Eu conheci alguns estudantes brasileiros e de outros países da América Latina que desistiram de seguir os seus cursos de doutorado no MPA alegando as formas desrespeitosas como eram tratados. Mesmo algumas das pessoas que seguiram até o final, concluindo os seus doutorados, acabaram desistindo anos depois de suas

carreiras. No entanto, a maioria dos pesquisadores do MPA é composta por homens. Mas quem serviu de modelo disciplinar foi uma mulher. Obviamente que não quero minimizar o comportamento assediador da pesquisadora em questão, mas é impossível não refletir sobre como os tratamentos de gênero são distintos. Ou mesmo os de gênero/raça quando comparamos por exemplo os silêncios e silenciamentos quando mulheres brancas e homens negros, por exemplo, estão em questão.

Temos, internacionalmente, mais dois casos emblemáticos em que os respectivos departamentos de astronomia, ambos históricos na área, foram extintos¹³. E ambos os casos envolvem pessoas brancas, homens e mulheres. Tim de Zeeuw, outro astrônomo europeu proeminente, teve desfecho parecido¹⁴.

Eu tive a chance de trabalhar mais de perto com uma das acusadas, Sofia Feltzing, e confesso que em vários momentos achei o comportamento dela *over*, fazendo questão de exalar o ar europeu de superioridade (tão copiado e reproduzido pelos sistemas coloniais do mundo acadêmico brasileiro).

Todos esses casos expressam questões de raça, classe social e gênero que transitam os sistemas coloniais, capitalistas e patriarcais que nos interessam nesse texto, nas relações hierárquicas de poder. Mais do que isso, eles nos alertam que diferentemente dos procedimentos adotados nas instituições estrangeiras, no Brasil temos ainda dificuldades para lidar com os abusos e os crimes perpetrados com base nas discriminações e violências de raça, gênero, classe, sotaques, etc.

Como romper com o *silêncio dos homens*? Como é que as pessoas, em relações assimétricas de poder, podem se sentir seguras para fazer denúncias sem ter as suas carreiras destruídas precocemente? Quando é que as *minorias* nos espaços de poder poderão falar e, se falarem, poderão seriamente ser ouvidas e não silenciadas? Quem poderá, nos espaços de poder, amplificar as vozes das pessoas que são excluídas e violentadas no cotidiano de suas funções? Como (e quando) as pessoas privilegiadas por raça/cor/gênero romperão com os seus silêncios? Como é que pessoas brancas trabalhando com questões raciais, por exemplo, lucrando do sistema racial opressor brasileiro podem se colocar contra a inserção de políticas de ação afirmativa em programas de pós-graduação

¹²(a) Guinevere Kauffmann — Disponível em: [Nature](#). Acesso em: 29 Dez. 2023;

(b) Neil deGrasse Tyson — Disponível em: [Scientific American](#). Acesso em: 29 Dez. 2023;

(c) Timothy Slater — Disponível em: [Nature](#). Acesso em: 29 Dez. 2023;

(d) Geoff Marcy — Disponível em: [BuzzFeed News](#). Acesso em: 29 Dez. 2023.

¹³Caso (a) Disponível em: [Science](#). Acesso em: 29 Dez. 2023. Caso (b) Disponível em: [Nature](#). Acesso em: 29 Dez. 2023.

¹⁴Disponível em: [Revista Fapesp](#). Acesso em: 30 Dez. 2023.

ou mesmo na contratação de professoras e professores nas universidades e outros centros de pesquisa com argumentações frágeis de viés marxista (classe) e de meritocracia?

No caso da Sociedade Brasileira de Física (SBF), como já discutido em outras publicações (mas ver a original, [4]), há muito a ser feito para rompermos com o *silêncio dos homens*. A SBF é ainda uma sociedade pouco diversa e com muitos relatos de assédio sexual e moral sofridos por seus membros em suas instituições de origem. A radiografia é grave. Os dados mostram que o sistema masculino e de branquitude hétero-cis-normativo do sul e do sudeste parece muito efetivo na seleção das pessoas que compõem a SBF. Infelizmente, a SBF não é uma exceção quando analisamos a radiografia da Academia Brasileira de Ciências e de outras instituições representativas no Brasil e mundo afora nas ciências. O Efeito Tesoura¹⁵ tem sido atroz em eliminar mulheres e pessoas negras dos sistemas acadêmicos e temos, institucionalmente, compactuado com o *silêncio dos homens* nesse aspecto. Além disso, o estudo revela que as pessoas negras e LGBTQIA+ estão mais vulneráveis ao assédio moral e sexual nas ciências, sem contar o racismo e a LGBTQIA+fobia recreativos.

A Figura 3 exemplifica de que forma o *silêncio dos homens* corrobora para a construção de tecnologias que, desenvolvidas por pessoas sem letramento de raça, gênero e classe, corroboram para o aprofundamento de opressões que queremos combater nas carreiras científicas e tecnológicas. Nas ferramentas de busca na Internet, a violência é frequentemente associada a pessoas pobres negras periféricas; criminosos são preferencialmente identificados por Inteligência Artificial (IA) como pessoas negras; e a IA cria mulheres de realidade virtual que sofrem a misoginia e os assédios sexuais e morais estruturais. Esses exemplos nos encaminham para a urgência do rompimento do *silêncio dos homens* e para a promoção da justiça étnico-racial, cognitiva, social e de gênero, porque nós queremos mais mulheres, pessoas negras, LGBTQIA+, indígenas e quilombolas nos espaços de poder da sociedade brasileira e nos espaços científicos já que estes são lugares potentes para a transformação social. Os dispositivos de distribuição de equidade e igualdade devem ser organizados para além da empatia, da boa vontade ou do esforço individual; eles precisam estar imbuídos de consciên-

¹⁵O fato de que as mulheres e as pessoas negras e LGBTQIA+ vão desaparecendo ao longo da carreira nas ciências físicas.

cia histórica, política, com ação e transformação, para nos ajudar a repensar os processos de construção da ciência, história, filosofia e natureza da ciência.

E, por fim, em 3 de janeiro de 2024 fomos surpreendidos com a publicação de um artigo escrito pelo professor de física teórica da Universidade Estadual Paulista (UNESP), George Matsa, para o jornal O Estado de São Paulo (Figura 4)¹⁶. No artigo, o professor expressa sua completa ignorância a respeito das lutas antirracistas e dos estudos das relações étnico-raciais no país (nega e distorce a realidade). Ele apresenta, nesse texto, o sistema colonial, patriarcal e capitalista, que tem no racismo a sua tecnologia mais fundamental. Ele não apenas não se cala, como ainda distorce as evidências para manter as relações hierárquicas de poder. Permeado de privilégios, alinha-se ao que Cida Bento chama de *pacto narcísico da branquitude* que, como discutimos antes, perpassa o silêncio dos homens quando da discussão racial em suas múltiplas intersecções.

Em uma série de posts publicado no meu Instagram¹⁷ (mídia social), fiz os seguintes comentários ao texto do físico:

O Jornal O Estado de São Paulo deu voz e vez (zero novidade) a George Matsas, professor de física teórica da UNESP, que diz que “a USP, sempre pioneira, ERRA agora ao instituir cotas para candidatos pretos, pardos e indígenas em concursos públicos para docentes”.

Ele sequer sabe que a USP nada tem de pioneira no que tange a promoção de ações afirmativas étnico-raciais no Brasil.

O texto de George Matsas exemplifica o que venho chamando em alguns dos meus artigos e conferências de vozes de “cientistas negacionistas” para além dos clássicos exemplos de negacionismos discutidos ou de preocupação nas ciências físicas.

Muitos cientistas, filósofos, artistas e outras pessoas que deveriam “viver a vida com o pensamento” seguem negando o racismo. São, portanto, NEGACIONISTAS. Sim, NEGACIONISTAS!

George Matsas nega o racismo à brasileira em seus subterrâneos.

¹⁶Disponível em: [Estadão](#). Acesso em: 3 Jan. 2024.

¹⁷Disponível em: [Instagram](#). Acesso em: 4 Jan. 2024.



Figura 3: As tecnologias e os vieses de raça, classe social e gênero.

Com abuso e desonestidade intelectual, típica de pessoas negacionistas, escreve com base nas próprias ideologias, sem qualquer embasamento teórico-epistemológico e prático nas lutas e nos estudos sobre as dinâmicas do racismo e das relações raciais no país.

Como um funcionário público, e um cientista que deveria embasar os argumentos em evidências científicas, presta um grande desserviço ao povo brasileiro.

Move-se na contramão do que temos feito nas universidades e instituições científicas (no Brasil e fora dele) no combate ao racismo acadêmico que garante a presença majoritária de pessoas brancas (homens e mulheres), CIS-hétero normativos no sistema de pós-graduação.

O pensamento ao qual George Matsa se alinha é o mesmo que naturaliza o extermínio físico e epistêmico de pessoas negras, quilombolas e indígenas nos espaços de poder e de protagonismo científico, tecnológico, filosófico e artístico no país.

Cida Bento, grande intelectual negra, nos ensina sobre o pacto narcísico da branquitude. E Nêgo Bispo, que recentemente nos deixou, nos traduziu que as nossas lutas são sempre “começo, meio e começo”.

Avançaremos! Feliz 2024!

6 Considerações Finais

Os homens matam e se matam e são hoje agentes importantes para a desarticulação de sistemas de opressão que passam pelos marcadores sociais de raça, classe social e gênero no Brasil. Não há como transformarmos as realidades de violência que têm exterminado mulheres, negros, indígenas, quilombolas e pessoas LGBTQIA+ sistematicamente no país, sem que os homens se vejam no lugar de gênero e de uma branquitude hétero-cis-normativa extremamente perigosa, não somente para eles mesmos mas também para a vida em comunidade.

As masculinidades precisam ser aprofundadas em todas as esferas das relações de ser, saber, poder e sentir, rompendo-se com o *silêncio dos homens* sobre temas importantes de justiça social, racial, cognitiva e de gênero. Notadamente, romper os silêncios sobre

ESPAÇO ABERTO

Racismo universitário

George Matsas

Em 22 de maio de 2023, o Conselho Universitário da Universidade de São Paulo (USP) regulamentou a adoção de políticas afirmativas para pretos, pardos e indígenas (PPI) a serem usadas na contratação de docentes e admissão de servidores técnicos e administrativos. Bancas de heteroidentificação serão responsáveis por averiguar a validade da autodeclaração feita pelo candidato PPI no processo de seleção.

A USP, a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e a Universidade Estadual Paulista (Unesp) já usam comissões de averiguação étnica para confirmar a autodeclaração de estudantes PPI que competem para entrar nas universidades públicas paulistas, mas é a primeira vez que tais comissões serão usadas na admissão de professores e demais servidores.

O uso de bancas étnicas não é extremamente perigoso, como mostra a História, mas também inviável em um país miscigenado como o nosso. Por mais bem-intencionados que sejam os membros de tais bancas, as decisões só podem ser fruto de "achismo" pessoal, o que colide com a missão universitária de se pautar pela razão.

O reitor da USP, Carlos Gil-

berto Carloti Jr., declarou ao *Jornal da USP*, em 22 de maio passado, que a adoção de políticas afirmativas para a contratação de docentes e demais servidores PPI é uma "decisão histórica". Mas, a nosso ver, ela só se qualificaria como histórica por ser uma das mais equivocadas que a universidade já tomou.

Não se questiona aqui suas boas intenções, mas, sim, a estratégia de se usar leis raciais "boas" no presente para se remediar leis raciais más do passado. Leis raciais não se cancelam; elas só se somam, levando a mais divisão e ressentimento no futuro.

E há mais: a decisão da USP implica mau uso de recursos públicos. Senão vejamos: a principal fonte de financiamento das universidades públicas paulistas vem da alíquota de 9,57% do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços (ICMS), pago por todos os consumidores, incluindo os mais pobres. Isso só se justifica se as universidades públicas paulistas funcionarem como um investimento de longo prazo, selecionando e treinando nossos jovens mais talentosos por meio do melhor corpo docente possível, independentemente de cor, raça, credo, orientação sexual e tudo mais.

Ao instituir cotas na contra-

A USP, sempre pioneira, erra agora ao instituir cotas para candidatos pretos, pardos e indígenas em concursos públicos para docentes

tação de docentes para indivíduos PPI, a universidade abre mão de ter os melhores quadros, com os recursos públicos disponíveis, em nome de uma política antissocial que coloca em segundo plano a formação das futuras gerações (PPI ou não) da mesma sociedade que a financiou.

Há dez anos, o governo de São Paulo instituiu o programa de cotas sociais para o ingresso de estudantes nas universidades públicas paulistas. Esse programa, mesmo que paliativo, tinha o correto intuito

de corrigir a injustiça de colocar lado a lado para concorrer estudantes preparados por excelentes escolas privadas com outros de escolas da rede pública sabidamente deficientes.

Na falta de solução melhor, acertava o Estado quando reservava um certo número de vagas para estudantes da rede pública, que, com isso, passaram a ter mais chances de ingressarem na universidade, evitando, assim, o desperdício de talentos. Ao mesmo tempo, contudo, errava cabalmente ao incluir critérios raciais, além dos sociais, no preenchimento de tais vagas.

A USP, sempre pioneira, erra agora ao instituir cotas para candidatos PPI em concursos públicos para provimento de cargos docentes, onde todos os candidatos (PPI ou não) já são superqualificados, devendo, assim, competir em igualdade de condições. Trata-se não de outra coisa senão de uma discriminação às avessas.

Verdade seja dita, o uso de políticas afirmativas para indivíduos PPI não é privilégio das universidades públicas paulistas. Em 1978 a Suprema Corte norte-americana considerou que critérios de raça poderiam ser considerados no processo de admissão universitária. Contudo, em 29 de junho do ano passado, a mesma Suprema

Corte norte-americana voltou atrás, julgando inconstitucional o uso de critérios raciais para a seleção de estudantes de ensino superior em todo o país.

Aqui, no Brasil, o Supremo Tribunal Federal (STF) declarou constitucional o uso de reserva de vagas para membros PPI em 2017. Esperemos que o STF, como guardião da Constituição brasileira, não precise de 45 anos para voltar atrás, fazendo valer o artigo 5.º, segundo o qual "todos são iguais perante a lei, sem distinção de qualquer natureza".

A História ensina que não há lei racial boa, pois, por melhor que sejam suas intenções iniciais, ela inute na cabeça das pessoas a ideia de que a cor da pele, o tamanho do nariz ou a forma dos olhos têm alguma importância, e há inúmeros exemplos trágicos de como isso pode ser distorcido para o mal dependendo das circunstâncias.

Reconhecer que o País está envenenado pelo mal do racismo é um mérito. Estudar formas de combatê-lo é um mérito ainda maior. Mas usar como remédio o próprio veneno só vai envenená-lo ainda mais. ●

PROFESSOR TITULAR DO INSTITUTO DE FÍSICA TEÓRICA DA UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. É MEMBRO TITULAR DA ACADEMIA DE CIÊNCIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. PROFESSORES@FT.USP.BR|george.matsas

Figura 4: Exemplo típico do negacionismo no contexto do racismo à brasileira.

a subrepresentação de pessoas negras, quilombolas, indígenas e LGBTQIA+ em posições de prestígio no ambiente acadêmico-científico e a naturalização dessas pessoas em *não lugares* ou lugares de subalternidade nas relações sociais do país.

As instituições de ensino superior no Brasil desenvolvem papel crucial na formação inicial e continuada de diferentes profissionais. As questões étnico-raciais e de gênero precisam sair da leitura simplista *identitária*, como se fossem de interesse apenas de uma minoria barulhenta (que tampouco é a minoria do país) em/por espaços de poder. E, para isso, é importante construirmos outros processos educativos com ações enérgicas na relação universidade-escola-sociedade, nos espaços de divulgação e representação científica. Uma outra forma de divulgação da ciência precisa ser construída, entendendo a divulgação científica como um aspecto valoroso do trabalho e da carreira científica e ferramenta fundamental na construção de outros papéis sociais e relações nas ciên-

cias.

O aspecto mais grave da *semiótica do silêncio dos homens* diz respeito aos processos de desumanização de vários sujeitos e da simplificação da ideia de que as ciências são construções humanas, sem questionamentos sobre quem são esses humanos.

Além disso, precisamos avançar sobre a ideia de que não há *ciência dura*, objetiva, neutra, porque as ciências são compostas por (algumas) pessoas que, obviamente, tomam suas decisões o tempo inteiro amparadas em seus posicionamentos politicamente implicados, por meio de seus valores, vieses, preconceitos e estereótipos.

Nêgo Bispo, que recentemente se encantou, bem como Abdias do Nascimento, Frantz Fanon, Fran Demétrio, Ailton Krenak, bell hooks, Mariléa de Almeida e tantas e tantos outros autores que foram trazidos neste texto, apresentam uma vasta obra que compartilha conosco formas revolucionárias de construirmos outras masculinidades e sistemas educacionais

que vislumbram o fortalecimento dos sentidos comunitários, rompidos por meio das políticas de morte impostas aos corpos dissidentes das normas excludentes. Como nos traduz Nêgo Bispo, a luta antirracista (antissexista e anticapitalista) é permeada por começo, meio e começo. No campo dos direitos fundamentais, são lutas e disputas sem tréguas.

Como eu comecei esse texto mencionando a distopia por trás do entendimento de que certos homens são parte pujante do *masculino dominador*, que ocupam lugares de protagonismo na perpetuação das violências tratadas ao longo do texto. Eu termino então esse artigo com uma utopia: que os homens, coletivamente, porque essa é uma responsabilidade dos homens, possam se sentir desafiados a criar, produzir, imaginar, inventar, afetar e se deixar ser afetado por novas masculinidades com a garantia do direito à existência de pessoas negras, mulheres, LGBTQIA+, indígenas e quilombolas. Precisamos de homens comprometidos com sistemas outros de justiça para a construção de um outro país, mais justo social e cientificamente. Precisamos de homens suficientemente corajosos (sem medos) e das mulheres que a eles se alinham, para desmontar os *clubes do bolinha* e as lógicas de *broderagem* que lhes têm garantido, em *silêncio* (mas não sem r[existências]), privilégios históricos, a partir da ideia da supremacia branca, masculina (hétero-cis-normativa) e de classe (mérito) social.

Sobre o autor

Alan Alves Brito é Bacharel em Física pela Universidade Estadual de Feira de Santana (2002), Mestre (2004) e Doutor (2008) em Ciências (Astrofísica Estelar) pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Realizou estágios de doutorado no Chile (Alfa/LENAC), Estados Unidos (FAPESP) e Austrália (Sanduíche CAPES). Foi pesquisador visitante em centros de pesquisa em Portugal e Alemanha. Realizou estágios de pós-doutorado (2008-2014) no Chile (PUC) e na Austrália (Swinburne University e Australian National University, onde também atuou como Super Science Fellow). Atualmente é Professor Adjunto no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde desenvolve atividades de ensino, pesquisa, extensão, divulgação científica e gestão. Realizou especialização em Literatura Brasileira (2023) e é doutorando

em educação (2023), ambos pela UFRGS. Tem trabalhado em pesquisa (Programas de Pós-Graduação em Física/UFRGS; PPG em Ensino de Física/UFRGS; PPG em Divulgação em Ciências/Fiocruz; e no Núcleo de Estudos Africanos, Afro-Brasileiros e Indígenas/UFRGS) em temas voltados para a evolução química de diferentes populações estelares da Via Láctea, educação e divulgação de Astronomia e Física. Também é membro da União Astronômica Internacional, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, Sociedade Astronômica Brasileira, Sociedade Brasileira de Física, Associação Brasileira de Pesquisadores(as) Negros(as) e Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, eleito em 2014 Membro Correspondente da Academia de Ciências da Bahia. Coordena o PLOAD (Portuguese Language Office of Astronomy for Development) e é representante brasileiro no Office for Education, ambos da União Astronômica Internacional. Autor de livros de literatura, educação e divulgação em ciências, um deles finalista do Prêmio Jabuti 2020. Prêmio José Reis de Divulgação Científica e Tecnológica 2022, Categoria Pesquisador e Escritor.

Referências

- [1] K. Rosa e F. M. Mensah, *Educational pathways of Black women physicists: Stories of experiencing and overcoming obstacles in life*, *Physical Review Physics Education Research* **12**(2), 020113 (2016).
- [2] A. C. F. Santos, *You Don't Look Like a Physicist*, *The Physics Teacher* **55**(9), 524 (2017).
- [3] K. Rosa, *Science identity possibilities: a look into Blackness, masculinities, and economic power relations*, *Cultural Studies of Science Education (PRINT)* **13**, 1 (2018).
- [4] C. Anteneodo et al., *Brazilian physicists community diversity, equity, and inclusion: A first diagnostic*, *Physical Review Physics Education Research* **16**(1), 010136 (2020).
- [5] V. Morcelle, G. Freitas e Z. M. Da Costa Ludwig, *From School to University: An Overview on STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics) Gender in Brazil*, *Quarks: Brazilian Electronic*

- [Journal of Physics, Chemistry and Materials Science](#) **1**(1), 40 (2019).
- [6] A. Alves-Brito, *Os corpos negros: questões étnico-raciais, de gênero e Suas intersecções na Física e na Astronomia Brasileira*, [Revista da Associação Brasileira de Pesquisadores/as Negros/as](#) **12**(34), 816 (2020).
- [7] A. Alves-Brito, *Cosmologias racializadas: processos políticos e educativos anti(racistas) no ensino de Física e Astronomia*, [Roteiro](#) **46**, e26279 (2021). [ArXiv:e26279](#).
- [8] P. C. Vieira, N. T. Massoni e A. Alves-Brito, *O papel de Cecília Payne na determinação da composição estelar*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **43**(2), 1 (2020). [ArXiv:e20210028](#).
- [9] A. Alves-Brito e J. R. Macedo, *A história da ciência e a educação científica pelas perspectivas ameríndia e amefricana*, [Revista Brasileira de História da Ciência](#) **15**(2), 400 (2022).
- [10] I. Silva, *Raça e gênero na Física: Trajetórias acadêmicas de mulheres negras*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2023).
- [11] bell hooks, *Ensinando Comunidade: uma pedagogia da esperança* (Elefante, São Paulo, 2021).
- [12] M. Almeida, *Devir Quilombola: antirracismo, afeto e política nas práticas de mulheres quilombolas* (Elefante, São Paulo, 2022).
- [13] C. Bento, *O pacto da branquitude* (Companhia das Letras, São Paulo, 2022).
- [14] Brasil, *Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação das Relações Étnico-Raciais e para o Ensino de História e Cultura Afro-Brasileira e Africana*, Resolução no 1, de 17 de junho de 2004. Brasília. (2004).
- [15] K. Rosa e M. Silva, *Feminismos e ensino de ciências: Análise de imagens de livros didáticos de física*, [Gênero](#) **16**, 83 (2015).
- [16] A. Alves-Brito, *Educação escolar quilombola: desafios para o ensino de Física e Astronomia*, [Plurais Revista Multidisciplinar](#) **6**(2), 60 (2021).
- [17] A. Alves-Brito, *Zumbi-Dandara dos Palmares: desafios estruturais e pedagógicos da Educação Escolar Quilombola para a promoção da equidade racial no Brasil do século 21* (Pragmatha, São Paulo, 2022).
- [18] K. Crenshaw, *Demarginalizing the intersection of race and sex: a black feminist critique of antidiscrimination Doctrine, feminist Theory and antiracist Politics*, [University of Chicago Legal Forum](#) **1989**(1), 138 (1989). Disponível em <https://chicagounbound.uchicago.edu/uclf/vol1989/iss1/8>, acesso em jul. 2024.
- [19] P. Collins e S. Bilge, *Interseccionalidade* (Boitempo, São Paulo, 2021), tradução de Rane Souza.
- [20] B. Nascimento, *Uma história feita por mãos negras: relações raciais, quilombos e movimentos: organização Alex Ratts* (Zahar, Rio de Janeiro, 2021).
- [21] R. W. Connell e J. W. Messerschmidt, *Masculinidade hegemônica: repensando o conceito*, [Estudos Feministas](#), Florianópolis **21**(1), 241 (2013).
- [22] J. Trevisan, *Seis balas num buraco só: a crise do masculino* (Objetiva, São Paulo, 2021).
- [23] J. Bola, *A masculinidade desmascarada* (Dublinese, Porto Alegre, 2020).
- [24] bell hooks, *A gente é da hora: homens negros e masculinidades* (Elefante, São Paulo, 2022).
- [25] I. Jablonka, *Homens justos: Do patriarcado às novas masculinidades* (Todavia, São Paulo, 2021).
- [26] M. Oliveira, L. Nascimento e J. Jesus, *Gritarias Epistêmicas*, [Devires](#) **1**(1), 203 (2022).
- [27] J. G. d. Jesus, *Feminismos Contemporâneos e Interseccionalidade 2.0: Uma contextualização a partir do pensamento transfeminista*, [REBEH](#) **1**(1), 5 (2018).
- [28] L. Nascimento, *Transfeminismo* (Jandaíra, São Paulo, 2021).
- [29] K. Rosa, A. Alves-Brito e B. C. S. Pinheiro, *Pós-verdade para quem? Fatos produzidos por*

uma ciência racista, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **37**(3), 1440 (2020).

- [30] A. Mbembe, *Necropolítica*, *Arte & Ensaios* **32** (2018).
- [31] P. Freire, *À sombra desta mangueira*, 11ª edição (Paz & Terra, Rio de Janeiro, 2015).
- [32] A. Santos, *Colonização, quilombos: modos e significações* (CNPq, Brasília, 2015).
- [33] G. Kilomba, *Memórias da Plantação: episódios de racismo cotidiano* (Cobogó, Rio de Janeiro, 2019).
- [34] F. Fanon, *Pele negra, máscaras brancas* (EDUFBA, Salvador, 2008), tradução de Renato da Silveira.
- [35] S. Carneiro, *Escritos de uma vida* (Letramaneto, Belo Horizonte, 2018).

O mistério do Local Cosmic Void

C. Franco, F. Avila e A. Bernui

Observatório Nacional

Resumo

O Modelo Λ CDM-plano (Λ é a constante cosmológica e CDM, *cold dark matter*) é o que melhor se ajusta aos dados observacionais atualmente. Ele se fundamenta no Princípio Cosmológico, que assume a homogeneidade e a isotropia estatísticas do universo em larga escala. Estudando as propriedades desta última no Universo Local (UL) por meio do catálogo ALFALFA (*Arecibo Legacy Fast ALFA Survey*) – um levantamento que cobre $\sim 7000 \text{ deg}^2$ do céu e conta com 31502 fontes extragalácticas de HI, distribuídas no intervalo $0 < z < 0.06$ e divididas entre os hemisférios Norte e Sul Galácticos – encontramos resultados que indicam a existência de uma região contendo poucas galáxias, e que foi descrita pela primeira vez por Tully & Fischer (1987), ficando conhecida como *Local Cosmic Void*. Nossas análises são independentes de modelo e usam a função de correlação angular de dois pontos (2PACF) como aferidor estatístico, além de simulações do tipo *lognormal* (que consideram os parâmetros cosmológicos) para a estimativa das incertezas dos resultados. Para entender as propriedades e a morfologia da estrutura encontrada, fizemos testes com *voids* simulados, além de investigações comparativas com as descrições de *voids* do UL disponíveis na literatura. Nossos resultados indicam que o LCV possui contraste de densidade numérica $\delta \simeq -0.3$, correspondente a uma subdensidade de $\sim 150 \text{ Mpc}$ de comprimento e $\sim 60 \text{ Mpc}$ de largura, características que concordam com a literatura.

Abstract

The flat- Λ CDM Model (Λ is the cosmological constant and CDM, *cold dark matter*) is the model that best fits current observational data. It is based on the Cosmological Principle, which assumes statistical homogeneity and isotropy of the universe on a large scale. Studying the properties of the latter in the Local Universe (LU) through the ALFALFA catalog (*Arecibo Legacy Fast ALFA Survey*) – a survey that covers $\sim 7000 \text{ deg}^2$ of the sky and has 31502 extragalactic sources of HI, distributed in the interval $0 < z < 0.06$ and divided between the North and South Galactic hemispheres – we found results that indicate the existence of a region containing few galaxies, and which was first described by Tully & Fischer (1987), becoming known as the *Local Cosmic Void*. Our analyzes are model-independent and use the two-point angular correlation function (2PACF) as a statistical gauge, in addition to *lognormal* simulations (which consider cosmological parameters) to estimate the uncertainties of the results. To understand the properties and morphology of the structure found, we carried out tests with simulated *voids*, in addition to comparative investigations with the descriptions of LU *voids* available in the literature. Our results indicate that the LCV has a numerical density contrast of $\delta \simeq -0.3$, corresponding to a subdensity of $\sim 150 \text{ Mpc}$ in length and width of $\sim 60 \text{ Mpc}$, characteristics that agree with the literature.

Palavras-chave: cosmologia, modelo padrão, vácuo local.

Keywords: cosmology, standard model, local void

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44878](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44878)

1 Introdução

O modelo cosmológico Λ CDM se fundamenta no Princípio Cosmológico, o qual estabelece que em escalas consideráveis –i.e., cerca de 100 Mpc [1–7] em 3-dimensões, e 20° [8] em 2-dimensões–, o universo é estatisticamente homogêneo (invariante sob translação) e isotrópico (invariante sob rotação) [9–16]. É importante ressaltar que homogeneidade e isotropia são conceitos independentes, embora a presença de isotropia em todos os pontos do espaço implique em

homogeneidade [10].

Se em largas escalas o universo é uniforme, o mesmo não é válido em escalas cada vez menores. A presença de pequenos corpos, filamentos, aglomerados e vazios (*voids*) se torna mais proeminente, destacando uma distribuição irregular das estruturas. Isso realça a importância de considerar o caráter estatístico da homogeneidade e isotropia nas análises.

A aplicação do Princípio Cosmológico ao Universo Local (UL) tem relevância devido à nossa falta de conhecimento sobre muitas estruturas presentes na

nossa vizinhança cósmica. Um exemplo notável é o Local Cosmic Void (LCV), localizado a ~ 1 Mpc do Grupo Local [17–19]. O LCV exibe uma baixa densidade de matéria luminosa dentro de seus limites, e estudos recentes sugerem que ele possa ser um *void* de largura entre 150 – 300 Mpc [18–24], um tamanho que impressiona pela grandiosidade [18, 25].

Além de suas dimensões notáveis, o LCV parece desempenhar um papel significativo em efeitos dinâmicos, como as velocidades peculiares observadas em galáxias próximas [18, 22, 23, 26]. Esses indícios motivaram investigações adicionais. Por isso, estudamos a distribuição das estruturas no UL usando o catálogo ALFALFA (Arecibo Legacy Fast ALFA Survey) e, mais especificamente, este trabalho complementa os resultados recentemente publicados por [27]. Essa análise oferece uma perspectiva nova sobre a configuração das estruturas observadas no UL.

Esta contribuição está organizada de acordo com a seguinte estrutura: na Seção 2, apresentamos os dados utilizados, os critérios de seleção e as propriedades dos catálogos sintéticos. Em seguida, na Seção 3, detalhamos a metodologia adotada para obter os resultados discutidos na Seção 4. Por fim, as conclusões são apresentadas na Seção 5.

2 Dados astronômicos

Para investigar a isotropia no UL ($z \lesssim 0.06$), utilizamos o catálogo ALFALFA (Arecibo Legacy Fast ALFA Survey) [28]. Essa escolha foi motivada pelas propriedades favoráveis deste levantamento, a saber:

- (i) boa densidade numérica ($n \sim 4 \text{ deg}^{-2}$), proporcionando quantidade significativa de dados para análise;
- (ii) alta cobertura espacial, abrangendo $\sim 7000 \text{ deg}^2$ ou $\sim 1/6$ do céu, o que é propício à divisão do céu em vários pedaços de tamanho mínimo apropriado; e
- (iii) bias relativo das fontes de HI, em relação à matéria, próximo ao bias de galáxias azuis [29, 30] que, por sua vez, é ~ 1 [8, 31]. Essa característica torna as fontes de HI como traçadores cósmicos interessantes para mapear a distribuição de matéria no UL.

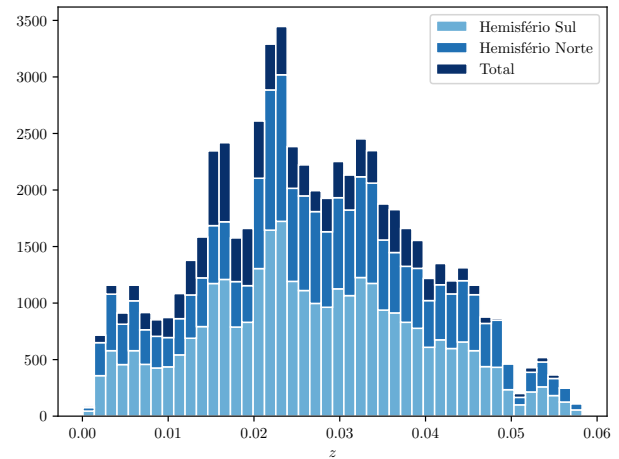


Figura 1: Histograma da distribuição de redshifts dos dados do ALFALFA, que ilustra a frequência de fontes no intervalo $0 < z < 0.06$ em cada hemisfério e na amostra completa.

Essas características conferem às fontes de HI uma singular relevância como traçadores cósmicos da matéria no UL.

Ao longo desta seção, serão apresentados os critérios de seleção dos dados do ALFALFA utilizados nesse trabalho (2.1), bem como o processo de criação dos catálogos sintéticos (2.2), necessários para as análises estatísticas.

2.1 Catálogo ALFALFA

Entre os anos 2005 e 2012 foram observadas 31502 fontes extragalácticas de nuvens de HI em 21 cm, com a versão completa do catálogo disponibilizada em 2018 [28, 32]. Esses objetos estão localizados no UL, dentro do intervalo de redshift $0 < z < 0.06$, distribuídos entre dois hemisférios: (i) Hemisfério Norte Galáctico (HNG, ou *Spring*) e (ii) Hemisfério Sul Galáctico (HSG, ou *Fall*), conforme mostra a Figura 1.

Ambos os hemisférios estão contidos na faixa de declinação $0^\circ < \delta < 36^\circ$, com o HNG cobrindo a região com ascensões retas entre $7^h 20^m < \alpha < 16^h 40^m$ e o HSG compreendendo $21^h 30^m < \alpha < 3^h 15^m$. Dentro do conjunto total de objetos, 21578 estão no HNG, enquanto 9924 estão localizados no HSG, conforme ilustrado na Figura 2.

Seguindo os critérios estabelecidos pela equipe do ALFALFA, os dados foram classificados como CODE 1 ou CODE 2 [28]. Um desses critérios é a razão Sinal-Ruído (SNR, do inglês, *signal-to-noise ratio*). Caso a fonte esteja associada a uma contraparte óptica (OC, ou *Optical Counterpart*) com redshift comparável e possua $\text{SNR} > 6.5$, sua classificação será

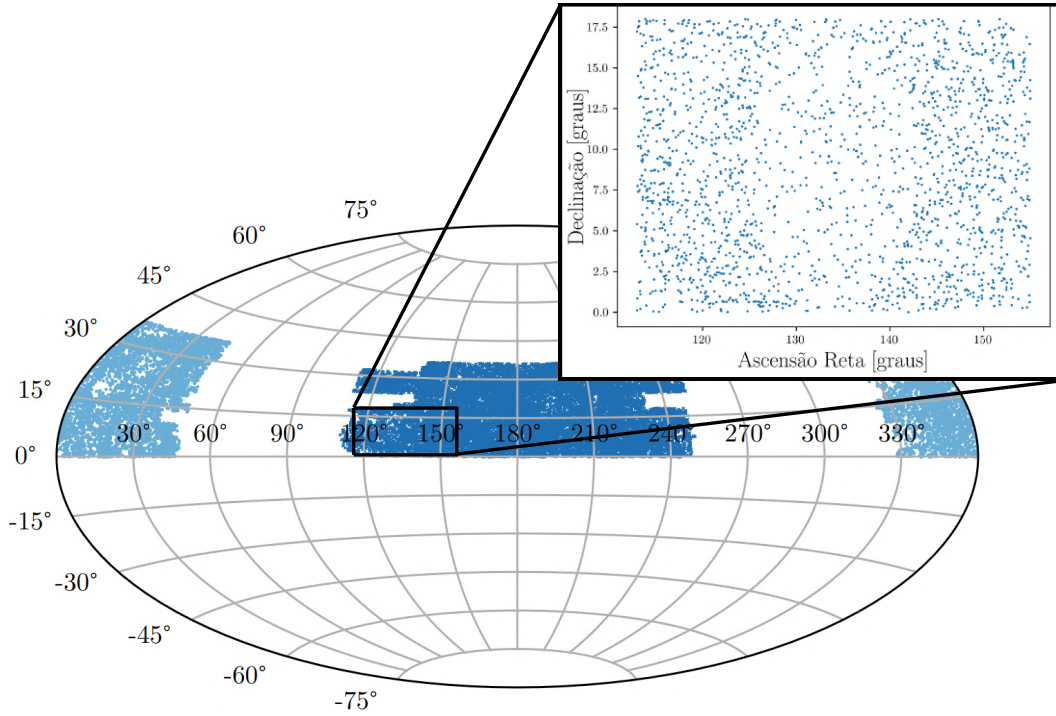


Figura 2: *Footprint* do catálogo ALFALFA em coordenadas equatoriais. A região central corresponde ao Hemisfério Norte Galáctico e as regiões nos extremos, juntas, correspondem ao Hemisfério Sul Galáctico. Em destaque, a Área 2, objeto de estudo deste trabalho.

CODE 1. Aquelas que coincidam com uma OC mas possuam $\text{SNR} \lesssim 6.5$ serão consideradas CODE 2. Fontes CODE 1 são aproximadamente 100% confiáveis [28] e, por esse motivo, foram as escolhidas para as análises feitas neste artigo. Esse critério reduziu nossa amostra para 16285 e 9149 fontes confiáveis nos HNG e HSG, respectivamente.

Prosseguindo, os hemisférios foram subdivididos para criar o maior número possível de regiões, cada uma com tamanho mínimo adequado para que não haja a predominância de ruído estatístico. Para essa subdivisão, adotamos como critério uma escala mínima para os polígonos, estabelecendo que estes deveriam ter mais de 20° [30]. Obtivemos, assim, dez regiões: seis no HNG e quatro no HSG.

É crucial notar que cada pedaço foi cuidadosamente delimitado de modo a evitar formatos que pudessem comprometer a reprodução do *footprint* em análise. Para garantir essa condição, alguns pontos adicionais foram removidos, resultando na amostra final contendo 15993 nuvens de HI no HNG e 8828 nuvens no HSG. As particularidades de cada região estão detalhadas na Tabela 1 [27].

Mesmo com variações na quantidade de fontes e na área de cada região, o foco principal está na busca por densidades numéricas (n) que sejam aproxima-

Tabela 1: Propriedades das dez regiões em análise. É de importância notar que a característica mais importante de cada região é a densidade numérica, cujo valor médio é $\bar{n} \simeq 3.42 \text{ deg}^{-2}$.

	Fontes	Área [deg^2]	n [deg^{-2}]
Area 1	1648	522	3.15 ± 0.08
Area 2	2081	756	2.75 ± 0.06
Area 3	3372	810	4.16 ± 0.07
Area 4	3427	810	4.23 ± 0.07
Area 5	2157	688	3.13 ± 0.07
Area 6	3308	864	3.83 ± 0.07
Area 7	2474	736	3.36 ± 0.07
Area 8	2844	875	3.25 ± 0.06
Area 9	1636	558	2.93 ± 0.07
Area 10	1874	558	3.36 ± 0.08

mente iguais – i.e., o número de objetos por unidade de área é mantido.

É importante notar que a região onde os dados do ALFALFA se concentram é repleta de estruturas, tais como grupos e aglomerados de galáxias, assim como também com vazios [17, 26, 33]. O modo como essas estruturas se distribuem determina a forma dos

campos gravitacionais que, por sua vez, dão origem às velocidades peculiares [34, 35]. Ao calcularmos a 2PCF, não fizemos correções a respeito dessas velocidades peculiares, pois consideramos que o tratamento adequado foi feito pela própria equipe do levantamento ALFALFA, seguindo o modelo de distâncias de [36], aplicado a fontes extragalácticas de HI com $cz_{\odot} < 6000 \text{ km s}^{-1}$ [28].

2.2 Catálogos sintéticos

Nossas análises empregaram catálogos sintéticos do tipo *random* para estimar a função de correlação de dois pontos, assunto que será explorado na Seção 3.1. Além disso, usamos catálogos *mock* para avaliar as incertezas associadas aos nossos resultados, tema a ser discutido na Seção 3.2.

Um catálogo randômico possui pontos pseudoaleatórios distribuídos uniformemente em um intervalo específico. Esses catálogos devem reproduzir a região em análise, ou seja, precisam ter os mesmos intervalos em ascensão reta e declinação, além de conter a mesma quantidade de pontos. Para o *footprint* apresentado na Figura 2, foram gerados 25 catálogos *random* seguindo o procedimento descrito por [37] (veja também [29, 38–41]).

Assim, considerando um número aleatório $R_i \in [-1, +1]$ em um intervalo $\Delta\delta'$, as declinações serão determinadas por

$$\delta_i = \arcsin R_i, \quad (1)$$

e as ascensões retas serão os valores no intervalo $\Delta\alpha'$.

Da mesma forma, um catálogo *mock* precisa reproduzir o *footprint* da região sob análise. No entanto, cada um dos catálogos desse tipo representa uma realização dos parâmetros de entrada previamente fornecidos ao código público LOGNORMAL GALAXIES [42] e que devem estar de acordo com as características do catálogo de dados, conforme listado na Tabela 2.

Além desses, o código também demanda os parâmetros cosmológicos que serão adotados na simulação. Para esta finalidade, usamos os resultados apresentados na Tabela 2 de [43], os quais estão listados na Tabela 3.

Dessa forma, criamos um conjunto composto por 1000 *mocks* que serão utilizados para estimar incertezas de maneira mais precisa. Isso se torna necessário, uma vez que catálogos randômicos tendem a gerar erros subestimados em comparação com as simulações [38, 44, 45].

Tabela 2: Configuração do survey usada para gerar um conjunto de 1000 catálogos *mock lognormal* usados nas análises.

Configuração do survey
$z = 0.0$
$b = 1.0$
$N_g = 2 \times 10^5$
$L_x = 230$
$L_y = 230$
$L_z = 230$

Tabela 3: Parâmetros cosmológicos disponibilizados por [43].

Cosmological parameters
$\Omega_b h^2 = 0.02236$
$\Omega_c h^2 = 0.1202$
$\ln(10A_s) = 3.045$
$n_s = 0.9649$
$\Sigma m_v = 0.06$
$h = 0.6727$

3 Metodologia

Nos estudos que abordam a estrutura em larga escala do universo, o uso da função de correlação de dois pontos (2PCF, do inglês *Two-Point Correlation Function*) é conveniente para quantificar a aglomeração de matéria [13, 45–51]. A versão bidimensional da 2PCF, a função de correlação angular de dois pontos (2PACF, ou *Two-Point Angular Correlation Function*), é vantajosa em análises independentes de modelo (como é a proposta desse trabalho), uma vez que requer apenas coordenadas angulares.

3.1 Função de correlação angular de dois pontos

Supondo uma coleção de N pontos distribuídos aleatoriamente em um volume V , a 2PACF é definida como a probabilidade de se encontrar dois objetos a uma dada separação angular [39, 52, 52, 53], calculada usando

$$\theta_{ij} = \cos^{-1} [\sin(\delta_i) \sin(\delta_j) + \cos(\delta_i) \cos(\delta_j) \cos(\alpha_i - \alpha_j)], \quad (2)$$

onde α_i , α_j e δ_i , δ_j são a ascensão reta e a declinação, respectivamente, das galáxias i e j .

Na literatura, encontram-se vários estimadores baseados na contagem de pares de objetos em função

da distância [54–57]. O estimador de Peebles-Hauser (PH) [55], chamado de estimador natural da correlação entre pares de objetos cósmicos, é

$$\omega(\theta)_{PH} = \frac{DD(\theta)}{RR(\theta)} - 1, \quad (3)$$

onde $DD(\theta)$ é o número de pares de objetos cósmicos no catálogo de dados com separação angular θ , normalizado pelo número total de pares; $RR(\theta)$ é uma quantidade similar, mas para pares no catálogo randômico. Valores nulos de $\omega(\theta)$ representam uma distribuição aleatória; enquanto valores positivos (negativos) indicam uma distribuição aglomerada (segregada) de matéria. PH é mais intuitivo – em termos físicos – que outros estimadores, uma vez que compara diretamente a contagem de pares de dados com pares randômicos [29].

Dessa forma, nosso próximo passo foi reunir todos os nossos catálogos (ALFALFA e sintéticos) e calcular a 2PACF usando 80 bins espaçados linearmente entre 0.01° e 40° .

3.2 Estimativa das incertezas

Os catálogos randômicos que usamos para calcular a 2PACF não são considerados satisfatórios para estimar as incertezas associadas a esse cálculo, levando a valores subestimados [38, 44]. Para contornar essa questão, usamos os *mocks* descritos na Seção 2.2, que fornecem uma avaliação mais fidedigna das flutuações estatísticas esperadas.

O procedimento seguiu a descrição feita na literatura como, por exemplo, por [40, 58, 59]. Após calcular a 2PACF para um conjunto de N_b bins usando os 1000 *mocks* e os 25 *random* gerados anteriormente, procedemos ao cálculo dos elementos da matriz de covariância de acordo com

$$\text{Cov}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [\omega_k(\theta_i) - \bar{\omega}_k(\theta_i)][\omega_k(\theta_j) - \bar{\omega}_k(\theta_j)], \quad (4)$$

onde os índices $i, j = 1, 2, \dots, N_b$ representam cada bin θ_i ; ω_k é a 2PACF para o k -ésimo *mock* ($k = 1, 2, \dots, N$); $\bar{\omega}(\theta_i)$ e $\bar{\omega}(\theta_j)$ são os valores médios para os bins i e j , respectivamente. A incerteza de $\omega(\theta_i)$ é a raiz quadrada da diagonal principal da equação (4), $\Delta\omega(\theta_i) = \sqrt{\text{Cov}_{ii}}$.

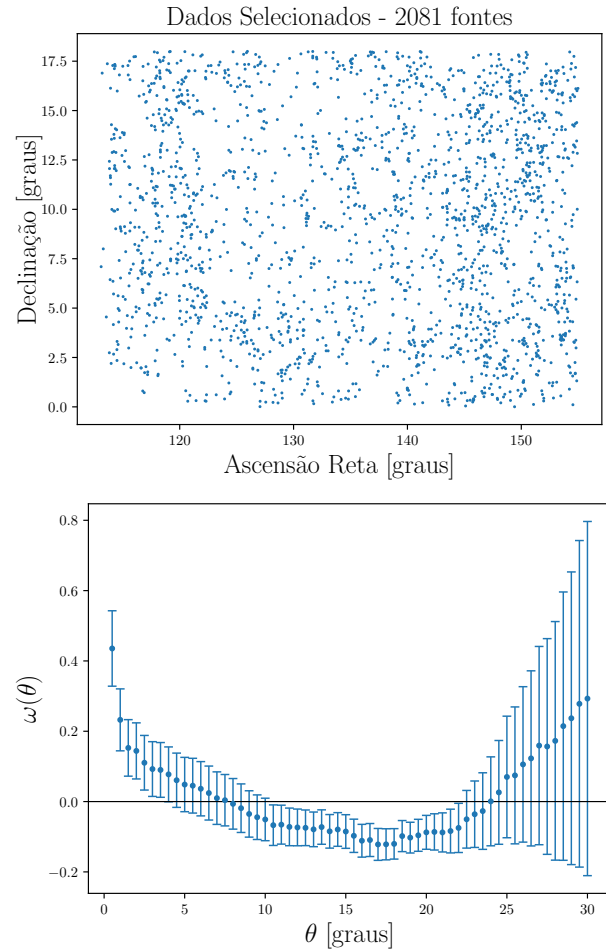


Figura 3: Superior: Projeção cartesiana da Área do HNG, contendo 2081 fontes extragalácticas. Inferior: 2PACF usando o estimador PH na Área 2.

4 Resultados

Após a divisão dos dados selecionados em 10 regiões, cada uma com área de $\sim 700 \text{ deg}^2$, procedemos ao cálculo da 2PACF em cada pedaço do céu. Utilizamos o estimador PH no intervalo $0^\circ < \theta < 40^\circ$, repartido em 80 bins de largura $\Delta\theta = 0.5^\circ$. Consideramos apenas separações angulares até $\theta \approx 30^\circ$, uma vez que a quantidade de pares disponíveis diminui substancialmente com o aumento da distância angular.

Algumas regiões apresentaram características peculiares [27], dentre elas, a Área 2, localizada entre as coordenadas $RA \in [113^\circ, 155^\circ]$ e $DEC \in [0^\circ, 18^\circ]$, conforme ilustrado na Figura 3.

A análise da 2PACF na Área 2 indicou uma sistemática falta de correlação ao longo de um amplo intervalo angular. Esse padrão sugere marcadamente a presença de uma subdensidade (ou *void*) bem acentuada. Essa característica é mais facilmente perce-

bida através do estimador PH, uma vez que ele faz a comparação direta entre a razão dados-*random* e a unidade. Contrapondo os resultados apresentados na Figura 8 de [27] com os da Figura 3 deste trabalho, nota-se, claramente, que a presença do *void* é melhor detectada pelo estimador PH.

Avançamos mais no estudo dessa região, recorrendo à função distribuição cumulativa (CDF, do inglês *cumulative distribution function*), que quantifica a probabilidade de uma variável aleatória X assumir valores menores ou iguais a x no intervalo $F_X : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$ [60]. Esse método proporciona uma análise das discrepâncias ou conformidades entre os dados observados e o modelo esperado. Comparamos os dados empíricos de distâncias (em Mpc) fornecidos pelo ALFALFA com a distribuição esperada, cujo resultado pode ser visto na Figura 4.

A CDF foi construída usando 44 bins e os parâmetros obtidos dos dados do ALFALFA: a média $\mu = 116$ Mpc e o desvio padrão $\sigma = 56$ Mpc. Ao comparar a CDF gerada com os dados observados, notamos duas regiões com depressões, uma menor em torno de $r \in [100, 140]$ e outra maior em $r \in [160, 245]$ [27].

A parte superior da Figura 4 oferece uma representação visual da dispersão dos objetos conforme a distância. Considerando toda essa informação com o resultado da CDF, verifica-se que as depressões estão relativamente próximas umas das outras. Essa proximidade sugere a possível interconexão entre os *voids*. Essa interpretação, respaldada por análises anteriores conduzidas por [61], indica que *voids* de pequeno e médio porte, quando projetados, podem ser percebidos como um único *void* de grandes dimensões.

Segundo nossos resultados, essa estrutura projetada na Área 2 está localizada aproximadamente em $100\text{Mpc} \lesssim r \lesssim 240\text{Mpc}$, o que corresponde a $\sim 140\text{Mpc}$ de comprimento e $\sim 60\text{Mpc}$ de largura [27].

4.1 Voids simulados

Para investigar mais propriedades da assinatura encontrada na 2PACF, desenvolvemos um modelo simplificado (*toy-model*) que mimetiza um *void*. Consideremos uma região do céu com as mesmas coordenadas da Área 2 e o mesmo número de objetos. Removemos 30% dos objetos de uma dada região circular com raio igual a 9° e os redistribuímos na parte externa ao círculo. O resultado desse procedimento pode ser visualizado na Figura 5.

A partir desses resultados, inferimos que a assina-

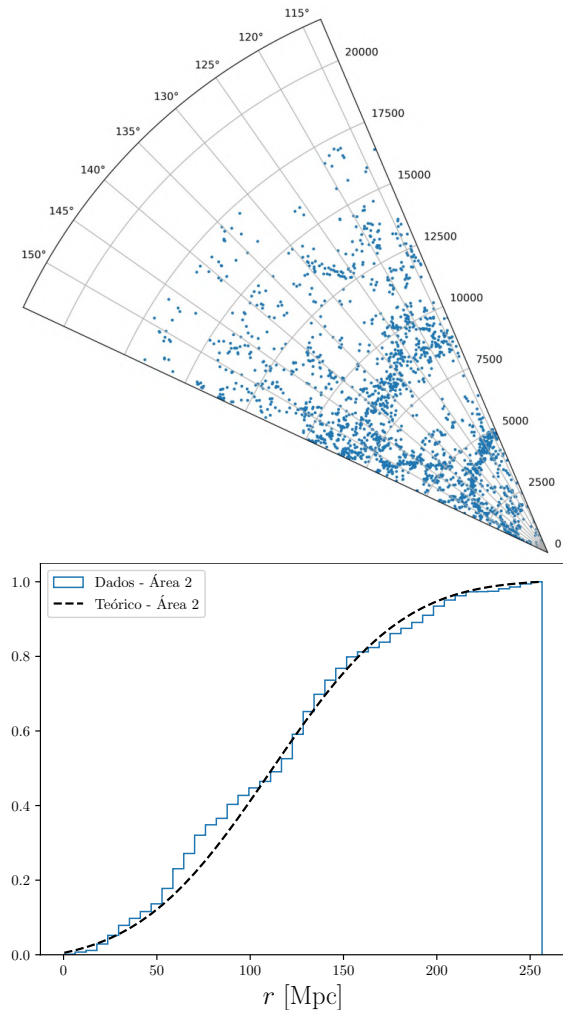


Figura 4: *Superior:* Distribuição de distâncias da amostra do ALFALFA na Área 2; *Inferior:* Comparação entre a distribuição teórica, dada por uma função gaussiana e os dados empíricos. Note que há duas visíveis depressões em torno de $r \in [100, 140]$ (menor) e $r \in [160, 245]$ (maior).

tura encontrada na 2PACF está associada a um *void* com contraste de densidade numérica $\delta \simeq -0.3$ que está parcialmente localizado na Área 2 [18, 25, 27]. Segundo todas as evidências apresentadas aqui, e em [27], a hipótese mais substancial sugere que essa subdensidade é o *Local Cosmic Void* (LCV) [18, 27].

5 Conclusões

Esse trabalho realizou análises independentes de modelo para estudar a isotropia estatística no UL usando dados públicos do catálogo ALFALFA ($z < 0.06$) e se justifica devido à importância significativa que o Princípio Cosmológico possui para o modelo de concordância. Os resultados obtidos aqui servem

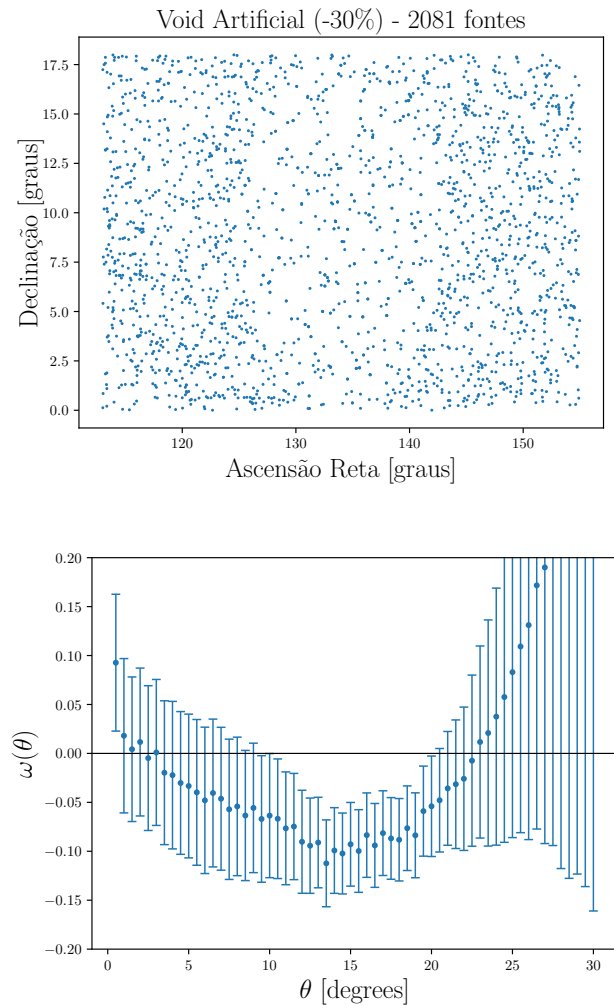


Figura 5: Experimento toy-model simulando um void com 9° de raio e contraste de densidade $\delta \simeq -0.3$. **Superior:** Amostra de dados com o void simulado. **Inferior:** A função 2PCF do void simulado.

como um teste complementar ao trabalho recentemente publicado por [27].

Baseado nisso, investigamos a distribuição angular do traçador cosmológico HI, selecionando dados estatisticamente confiáveis –classificados como CODE 1– e dividindo nossa amostra final em 10 regiões de tamanho mínimo apropriado. A cautela na escolha do tamanho de cada área se faz necessária para evitar que cada região seja grande demais e reduza a disponibilidade de dados para análise; ou pequena demais, comprometendo a densidade numérica. Além disso, delimitamos cuidadosamente cada recorte para eliminar formas irregulares e de difícil reprodutibilidade.

Nossas análises estatísticas foram feitas usando o estimador PH da função de correlação angular de dois pontos em cada uma das regiões. Com isso, encontramos peculiaridades em algumas regiões, dentre

elas, a Área 2. Nossas investigações mostraram que essa região apresenta uma grande subdensidade – ou uma coleção de subdensidades menores – que podem ter origem em um void com contraste de densidade $\delta \simeq -0.3$. Esse void está aproximadamente nas mesmas coordenadas onde estudos anteriores reportaram estar o Local Cosmic Void.

Para testar se a assinatura encontrada na 2PCF correspondia de fato a um void, realizamos um experimento toy-model, que mostrou que a Área 2 é bem compatível com um void de 9° e densidade de contraste numérico $\delta \simeq -0.3$.

Por fim, também utilizamos a função distribuição cumulativa para comparar os dados de distância fornecidos pelo ALFALFA com a distribuição esperada para a região, e encontramos, mais uma vez, evidências de que o void está (parcialmente) projetado na Área 2, com localização aproximada $100 \text{ Mpc} \lesssim r \lesssim 245 \text{ Mpc}$, correspondente a uma subdensidade de $\sim 150 \text{ Mpc}$ de comprimento e $\sim 60 \text{ Mpc}$ de largura, características que concordam com a literatura [25, 27, 61].

Agradecimentos

CF e AB agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de estudo concedidas para a realização desse trabalho. FA agradece ao CNPq e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Processo SEI 260003/014913/2023, pelo auxílio financeiro recebido.

Sobre a autora

Camila Franco (camilafranco@on.br) é formada em física pelo Instituto Federal Fluminense (IFF) e mestre em Astronomia pelo Observatório Nacional (ON). Atualmente, é doutoranda em Astronomia pelo ON, com ênfase em cosmologia observacional, onde estuda a estrutura em grande escala do universo.

Sobre os autores

Felipe Avila é licenciado em Física pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Realizou mes-

trado e doutorado em Astronomia pelo Observatório Nacional, com foco em Cosmologia Observacional. Atualmente, é pós-doutor júnior no Observatório Nacional, em uma parceria entre o CNPq e a FAPERJ, estudando estruturas em grandes escalas no universo e aplicações de Aprendizado de Máquina em Cosmologia.

Armando Bernui (bernui@on.br) é formado em física pela Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), em Lima, Peru; fez doutorado em Física-Matemática na Scuola Internazionale di Studi Superiori Avanzati (SISSA) em Trieste, Itália; atualmente estuda a evolução do Universo e a sua estrutura em grande escala. Formador de AstroCientistas.

Referências

- [1] P. H. Coleman e L. Pietronero, *The fractal structure of the universe*, *Physics Reports* **213**(6), 311 (1992).
- [2] D. W. Hogg et al., *Cosmic Homogeneity Demonstrated with Luminous Red Galaxies*, *The Astrophysical Journal* **624**(1), 54 (2005). [ArXiv:astro-ph/0411197](#).
- [3] P. Laurent et al., *A $14 h^{-3} \text{Gpc}^3$ study of cosmic homogeneity using BOSS DR12 quasar sample*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2016**(11), 060 (2016). [ArXiv:1602.09010](#).
- [4] S. Nadathur, *Seeing patterns in noise: gigaparsec-scale ‘structures’ that do not violate homogeneity*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **434**(1), 398 (2013). [ArXiv:1306.1700](#).
- [5] P. Sarkar et al., *The scale of homogeneity of the galaxy distribution in SDSS DR6*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **399**(1), L128 (2009). [ArXiv:0906.3431](#).
- [6] S. Sarkar e B. Pandey, *An information theory based search for homogeneity on the largest accessible scale*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **463**(1), L12 (2016). [ArXiv:1607.06194](#).
- [7] M. I. Scrimgeour et al., *The WiggleZ Dark Energy Survey: the transition to large-scale cosmic homogeneity*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **425**(1), 116 (2012). [ArXiv:1205.6812](#).
- [8] F. Avila et al., *The angular scale of homogeneity in the local Universe with the SDSS blue galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **488**(1), 1481 (2019). [ArXiv:1906.10744](#).
- [9] B. Ryden, *Introduction to cosmology* (Cambridge University Press, New York, NY, 2003).
- [10] B. Schutz, *A First Course in General Relativity* (Cambridge University Press, New York, NY, 2009).
- [11] A. Bernui, *Anomalous CMB north-south asymmetry*, *Physical Review D* **78**(6), 063531 (2008). [ArXiv:0809.0934](#).
- [12] P. K. Aluri e P. Jain, *Parity asymmetry in the CMBR temperature power spectrum*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **419**(4), 3378 (2012). [ArXiv:1108.5894](#).
- [13] G. A. Marques et al., *Isotropy analyses of the Planck convergence map*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **473**(1), 165 (2018). [ArXiv:1708.09793](#).
- [14] M. I. Khan e R. Saha, *Isotropy statistics of CMB hot and cold spots*, *JCAP* **2022**, 006 (2022). [ArXiv:2111.05886](#).
- [15] M. Ishaque Khan e R. Saha, *Level correlations of CMB temperature angular power spectrum*, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **43**(2), 100 (2022). [ArXiv:2101.06731](#).
- [16] C. E. Kester, A. Bernui e W. S. Hipólito-Ricaldi, *Probing the statistical isotropy of the universe with Planck data of the cosmic microwave background*, *Astronomy & Astrophysics* **683**, A176 (2024). [ArXiv:2310.02928](#).
- [17] R. B. Tully e J. R. Fisher, *Nearby galaxies Atlas* (Cambridge University Press, New York, NY, 1987).
- [18] R. B. Tully et al., *Cosmicflows-3: Cosmography of the Local Void*, *The Astrophysical Journal* **880**(1), 24 (2019). [ArXiv:1905.08329](#).

- [19] J. R. Whitbourn e T. Shanks, *The local hole revealed by galaxy counts and redshifts*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **437**(3), 2146 (2014). [ArXiv:1307.4405](#).
- [20] H. Böhringer, G. Chon e C. A. Collins, *Observational evidence for a local underdensity in the Universe and its effect on the measurement of the Hubble constant*, *Astronomy & Astrophysics* **633**, A19 (2020). [ArXiv:1907.12402](#).
- [21] M. Plionis e S. Basilakos, *The size and shape of local voids*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **330**(2), 399 (2002). [ArXiv:astro-ph/0106491](#).
- [22] R. B. Tully et al., *Our Peculiar Motion Away from the Local Void*, *The Astrophysical Journal* **676**(1), 184 (2008). [ArXiv:0705.4139](#).
- [23] R. B. Tully et al., *Cosmicflows-2: The Data*, *The Astronomical Journal* **146**(4), 86 (2013). [ArXiv:1307.7213](#).
- [24] J. R. Whitbourn e T. Shanks, *The galaxy luminosity function and the Local Hole*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **459**(1), 496 (2016). [ArXiv:1603.02322](#).
- [25] R. C. Keenan, A. J. Barger e L. L. Cowie, *Evidence for a ~ 300 Megaparsec Scale Underdensity in the Local Galaxy Distribution*, *The Astrophysical Journal* **775**(1), 62 (2013). [ArXiv:1304.2884](#).
- [26] Y. Hoffman et al., *The dipole repeller*, *Nature Astronomy* **1**, 0036 (2017). [ArXiv:1702.02483](#).
- [27] C. Franco, F. Avila e A. Bernui, *Probing cosmic isotropy in the Local Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **527**(3), 7400 (2024). [ArXiv:2312.03152](#).
- [28] M. P. Haynes et al., *The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic H I Source Catalog*, *The Astrophysical Journal* **861**(1), 49 (2018). [ArXiv:1805.11499](#).
- [29] E. M. Papastergis, *Statistical analysis of ALFALFA galaxies: Insights in galaxy formation & near-field cosmology*, Tese de Doutorado, Cornell University, New York (2013).
- [30] F. Avila et al., *The scale of homogeneity in the local Universe with the ALFALFA catalogue*, *JCAP* **12**(12), 041 (2018). [ArXiv:1806.04541](#).
- [31] J. G. Cresswell e W. J. Percival, *Scale-dependent galaxy bias in the Sloan Digital Sky Survey as a function of luminosity and colour*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **392**(2), 682 (2009). [ArXiv:0808.1101](#).
- [32] M. G. Jones et al., *Environmental dependence of the H I mass function in the ALFALFA 70% catalogue*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **457**(4), 4393 (2016). [ArXiv:1510.07050](#).
- [33] H. M. Courtois et al., *Cosmography of the Local Universe*, *The Astronomical Journal* **146**(3), 69 (2013). [ArXiv:1306.0091](#).
- [34] P. J. E. Peebles, *The Large-Scale Structure of the Universe* (Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1981).
- [35] N. Kaiser, *Clustering in real space and in redshift space*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **227**, 1 (1987).
- [36] K. L. Masters, *Galaxy Flows in and around the Local Supercluster*, Tese de Doutorado, Cornell University, New York (2005).
- [37] A. Bernui, T. Villela e I. Ferreira, *Analysis of the Angular Distribution of Cosmic Objects*, *International Journal of Modern Physics D* **13**(7), 1189 (2004).
- [38] E. de Carvalho et al., *Angular Baryon Acoustic Oscillation measure at $z=2.225$ from the SDSS quasar survey*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2018**(4), 064 (2018). [ArXiv:1709.00113](#).
- [39] E. de Carvalho, *Oscilações acústicas bariônicas nas distribuições de quasares e galáxias azuis*, Tese de Doutorado, Observatório Nacional, Rio de Janeiro (2019).
- [40] Y. Wang, R. J. Brunner e J. C. Dolence, *The SDSS galaxy angular two-point correlation function*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **432**(3), 1961 (2013). [ArXiv:1303.2432](#).

- [41] E. Keihänen et al., *Estimating the galaxy two-point correlation function using a split random catalog*, *Astronomy & Astrophysics* **631**, A73 (2019). [ArXiv:1905.01133](#).
- [42] A. Agrawal et al., *Generating log-normal mock catalog of galaxies in redshift space*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2017**(10), 003 (2017). [ArXiv:1706.09195](#).
- [43] Planck Collaboration et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020). [ArXiv:1807.06209](#).
- [44] P. Norberg et al., *Statistical analysis of galaxy surveys - I. Robust error estimation for two-point clustering statistics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **396**(1), 19 (2009). [ArXiv:0810.1885](#).
- [45] E. de Carvalho et al., *Baryon acoustic oscillations signature in the three-point angular correlation function from the SDSS-DR12 quasar survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **492**(3), 4469 (2020). [ArXiv:2002.01109](#).
- [46] G. A. Marques e A. Bernui, *Tomographic analyses of the CMB lensing and galaxy clustering to probe the linear structure growth*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **05**(5), 052 (2020). [ArXiv:1908.04854](#).
- [47] F. Avila et al., *The growth rate of cosmic structures in the local Universe with the ALFALFA survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **505**(3), 3404 (2021). [ArXiv:2105.10583](#).
- [48] F. Avila et al., *The homogeneity scale and the growth rate of cosmic structures*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **509**(2), 2994 (2022). [ArXiv:2111.08541](#).
- [49] F. Avila et al., *Inferring $S_8(z)$ and $\gamma(z)$ with cosmic growth rate measurements using machine learning*, *European Physical Journal C* **82**(7), 594 (2022). [ArXiv:2201.07829](#).
- [50] F. Oliveira et al., *Reconstructing the growth index γ with Gaussian Processes* (2023). [ArXiv:2311.14216](#).
- [51] F. Avila et al., *Baryon acoustic scale at $z_{\text{eff}} = 0.166$ with the SDSS blue galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **529**(4), 4980 (2024). [ArXiv:2404.00747](#).
- [52] P. J. E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton University Press, Princeton, N.J, 1993).
- [53] G. B. Lima Neto, *Astronomia Extragaláctica*, Notas de aula (2022). Disponível em <http://www.astro.iag.usp.br/~gastao/Extragal.html>, acesso em jul. 2024.
- [54] P. C. Hewett, *The estimation of galaxy angular correlation functions*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **201**, 867 (1982).
- [55] P. J. E. Peebles e M. G. Hauser, *Statistical Analysis of Catalogs of Extragalactic Objects. III. The Shane-Wirtanen and Zwicky Catalogs*, *Astrophysical Journal Supplement* **28**, 19 (1974).
- [56] M. Davis e P. J. E. Peebles, *A survey of galaxy redshifts. V. The two-point position and velocity correlations.*, *Astrophysical Journal* **267**, 465 (1983).
- [57] S. D. Landy e A. S. Szalay, *Bias and Variance of Angular Correlation Functions*, *apj* **412**, 64 (1993).
- [58] E. de Carvalho et al., *BAO angular scale at $z_{\text{eff}} = 0.11$ with the SDSS blue galaxies*, *Astronomy & Astrophysics* **649**, A20 (2021). [ArXiv:2103.14121](#).
- [59] A. D. Myers et al., *On statistical lensing and the anticorrelation between 2dF QSOs and foreground galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **359**(2), 741 (2005). [ArXiv:astro-ph/0502481](#).
- [60] L. Wasserman, *Random Variables*, in *All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference* (Springer, New York, 2004), 19–46.
- [61] C. M. Moorman et al., *The $H I$ mass function and velocity width function of void galaxies in the Arecibo Legacy Fast ALFA Survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **444**(4), 3559 (2014). [ArXiv:1408.3392](#).

Incertezas teóricas em testes do Princípio Cosmológico

Caroline Guandalin

University of Edinburgh

Queen Mary University of London

Resumo

Estudos recentes encontraram discrepâncias na nossa velocidade peculiar, derivada do nosso movimento em relação à radiação cósmica de fundo (RCF) e à distribuição da matéria em grandes escalas. Isso desafia o Princípio Cosmológico, um conceito fundamental que sugere que a nossa velocidade deve permanecer consistente tanto na RCF como nos referenciais da matéria. Este trabalho explora a função de luminosidade (FL) dos quasares, que descreve como esses objetos estão distribuídos em termos de distância e brilho. Discutirei como diferentes modelos para a FL dos quasares impactam nas estimativas teóricas do dipolo cinemático e como ignorar a mudança no brilho do quasar ao longo do tempo pode levar a resultados diferentes para nossa velocidade peculiar.

Abstract

Recent studies have found discrepancies in our peculiar speed, derived from our motion relative to the cosmic microwave background and the distribution of matter on large scales. This challenges the Cosmological Principle, a fundamental concept that suggests that our speed should remain consistent in both the cosmic microwave background and the frames of reference of matter. This work explores the luminosity function of quasars, which describes how these objects are distributed in terms of distance and brightness. I will discuss how different models for the luminosity function of quasars impact theoretical estimates of the kinematic dipole and how ignoring the change in quasar brightness over time can lead to different results for our peculiar velocity.

Palavras-chave: cosmologia, quasares, velocidade peculiar

Keywords: cosmology, quasars, peculiar velocity

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44955](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44955)

A relevância do Princípio Cosmológico

A Cosmologia como ciência se propõe a estudar modelos baseados em teorias físicas para o Universo, procurando entender como as hipóteses feitas para o universo primitivo (quais eram os componentes que preenchiam o universo e as teorias físicas que regem a sua dinâmica) evoluíram nas estruturas que observamos hoje. Esses modelos são comparados com observações particulares do universo observável, valendo-se, por exemplo, da luz emitida por fontes tais como as galáxias. Se observamos algo em conflito com as hipóteses do nosso modelo, devemos então tentar determinar o que falhou.

A descrição física dos modelos cosmológicos solidificou-se após o desenvolvimento da Relatividade Geral, sendo esta a melhor teoria para a gravitação que temos até o momento. A teoria pode ser

resumida pelas equações de Einstein,

$$G_{\mu\nu} \equiv R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

as quais descrevem a dinâmica do campo gravitacional através da métrica $g_{\mu\nu}$ e da matéria (sendo esta última descrita pelo tensor de energia-momento $T_{\mu\nu}$).

As equações de Einstein (Equação 1) não são fáceis de resolver; contudo, soluções analíticas podem ser obtidas uma vez que algumas hipóteses são feitas para a métrica e para a distribuição de matéria. Na cosmologia, assume-se comumente o Princípio Cosmológico, o qual restringe $g_{\mu\nu}$ e $T_{\mu\nu}$ para um universo cuja distribuição de matéria e radiação é espacialmente homogênea e isotrópica. Podemos então resolver a Equação (1) para um universo que idealmente satisfaz tais critérios. Outra hipótese que pode ser feita é a do Princípio Cosmológico Perfeito, que além de assumir um universo espacialmente

homogêneo e isotrópico, considera-se também isotropia temporal, ou seja, um universo imutável. Esta hipótese era assumida no modelo de estado estacionário (do inglês, *steady-state model*) [1].

Como a principal abordagem da cosmologia observacional é utilizar observações feitas no nosso cone de luz passado para determinar a geometria do universo e sua composição, através da comparação com algum modelo, o Princípio Cosmológico torna-se uma hipótese crucial, dado que este é assumido no primeiro passo para a derivação das equações que regem a dinâmica da evolução do universo. Portanto, testar a sua validade é imprescindível para a Cosmologia: se tal hipótese não se sustentar, teremos um número enorme de outras possibilidades para descrever a estrutura do espaço-tempo.

Radiação cósmica de fundo

Uma das observações mais surpreendentes que temos do nosso cone de luz passado é a radiação cósmica de fundo em micro-ondas (RCF), a qual nos permitiu excluir modelos de estado estacionário, favorecendo modelos com Big Bang: ela pode ser interpretada como consequência direta de um universo primitivo muito denso e quente que, ao se expandir e resfriar, possibilitou que átomos de hidrogênio neutro se formassem. Com a formação desses átomos, o universo que antes era opaco, devido ao espalhamento constante dos fótons pelos elétrons que constituíam o plasma quente que permeava o universo, tornou-se transparente à radiação, dando origem à superfície de último espalhamento. Porque os fótons interagiam constantemente com as partículas carregadas do plasma primordial, esses fótons estavam, aproximadamente, em *equilíbrio térmico*. Assim, quando os átomos neutros se formam, esses fótons desacoplam da matéria e passam a se propagar pelo universo. Observamos que as características físicas desse “banho térmico” concordam com as previsões obtidas a partir dos nossos conhecimentos de física nuclear, mecânica quântica e relatividade geral.

A densidade de energia para fótons em equilíbrio térmico, com frequência entre ν e $\nu + d\nu$, é descrita pelo espectro de corpo negro de Planck [2]:

$$u(\nu) d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu d\nu}{e^{h\nu/k_B T(\nu, \hat{n})} - 1}, \quad (2)$$

onde $T(\nu, \hat{n}) = T_0$ é a temperatura de um corpo negro perfeito (i.e., independe da frequência e direção de

observação \hat{n} no céu), h é a constante de Planck, c é a velocidade da luz no vácuo e k_B é a constante de Boltzmann.

Para um universo aproximadamente homogêneo e isotrópico, podemos considerar pequenas perturbações em torno da temperatura média T_0 : $T(\nu, \hat{n}) = T_0 + \delta T(\nu, \hat{n})$. Decompondo o mapa das flutuações de temperatura $\delta T(\nu, \hat{n})$ em termos dos harmônicos esféricos $Y_{\ell m}(\hat{n})$,

$$\frac{\delta T(\nu, \hat{n})}{T_0} = \sum_{\ell=0}^{\infty} \sum_{m=-\ell}^{\ell} a_{\ell m}(\nu) Y_{\ell m}(\hat{n}). \quad (3)$$

Termos que não dependem das componentes angulares, e.g., T_0 ou uma perturbação que depende apenas da frequência dos fótons $\delta T(\nu)$, contribuem para o *monopolo* a_{00} ($\ell = 0, m = 0$) da RCF, preservando sua homogeneidade e isotropia.¹ Na Figura 1 (a), está ilustrada a representação do espectro de corpo negro perfeito da RCF, com temperatura $T_0 \approx 2.7$ K observada em todas as direções do céu. Já os termos que dependem de \hat{n} são responsáveis pelas anisotropias observadas: por exemplo, $\delta T(\hat{n})$ representa as contribuições oriundas de pequenas perturbações presentes nas condições iniciais do universo, tais como aquelas descritas por modelos inflacionários (Figura 1, d).

O referencial da RCF

As anisotropias da RCF podem ser observadas ao analisarmos as diferenças de temperaturas em diferentes partes do céu, como feito pelos satélites COBE (Figura 1, b, c e d), WMAP² e Planck³. A maior contribuição corresponde a um dipolo a_{10} , que descreveremos em maiores detalhes na Seção 1.1, da ordem de 3.3 mK (Figura 1, b). Esse dipolo é mostrado na Figura 1 (b).

Chegamos então em um conceito fundamental para este trabalho: o referencial da RCF. Se partirmos da hipótese de que o universo é homogêneo e isotrópico, podemos assumir que o dipolo observado (Figure 1, b) é devido ao movimento do sistema solar com relação à matéria distante (e.g., o sistema solar orbita os braços da Via Láctea, que orbita o Grupo Local, o

¹Uma área muito promissora da cosmologia se propõe a analisar as flutuações em torno do corpo negro perfeito, dadas pela contribuição $\delta T(\nu)$. Essas perturbações são denominadas *distorções espectrais* [3].

²<https://map.gsfc.nasa.gov/>

³https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Planck

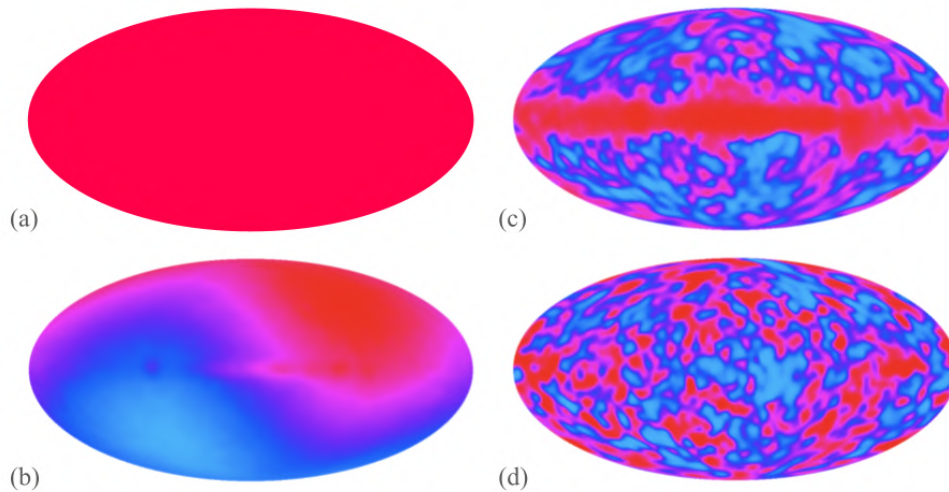


Figura 1: Temperatura do espectro da radiação cósmica de fundo em micro-ondas obtida pelo satélite COBE durante os primeiros dois anos (1990–1992) de observação do Radiômetro Diferencial de Microondas (RDM), para combinações lineares de mapas em diferentes frequências. (a) Representação dos dados do RDM para a temperatura de 2.7 K. (b) Mapa na escala de μK , deixando visível o dipolo devido à velocidade peculiar do sistema solar. (c) Mapa corrigido para o termo do dipolo. (d) Mapa corrigido para remover a contribuição da nossa galáxia, a qual é visível no centro das imagens (b) e (c). [Crédito: NASA/COBE Science Team].

qual por conseguinte se move em direção ao superaglomerado de Virgem). Dessa forma, ao subtrairmos essa contribuição, chegamos ao referencial no qual a temperatura da RCF é praticamente a mesma, em todas as direções, a menos de pequenas anisotropias da ordem de 10^{-5} K. Portanto, podemos definir o referencial da RCF como sendo aquele onde as perturbações na temperatura dos fótons são descritos, o mais próximo possível, por um campo aleatório Gaussiano (imagens à direita na Figura 1) [4]. Logo, somos capazes de inferir qual é a nossa velocidade peculiar v com relação a esse referencial.

Portanto, se o Princípio Cosmológico vale no Universo real, então homogeneidade e isotropia implicam que a nossa velocidade com relação a galáxias distantes, v_g , e outros objetos tais como quasares (ver Seção 2), deve ser a mesma da velocidade inferida através do dipolo da RCF, v_{RCF} , tanto em direção, quanto em módulo.

Neste trabalho, discutiremos em mais detalhes esse teste particular do Princípio Cosmológico, ou seja, a concordância entre v_g e v_{RCF} . Na Seção 1 detalharemos como o termo de dipolo aparece tanto no referencial da RCF, quanto no referencial da matéria; na Seção 2 introduziremos o conceito de função de luminosidade (FL), focando na FL dos quasares e, na Seção 3, discutiremos como incertezas na modelagem da FL pode impactar o teste do Princípio Cosmológico aqui considerado [5].

gico aqui considerado [5].

1 Dipolo cinemático

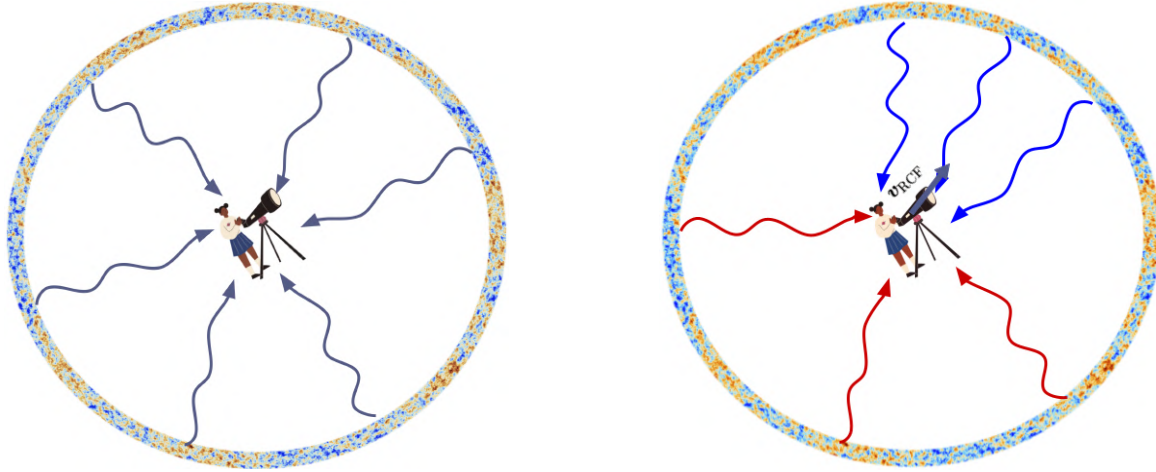
1.1 Efeito da velocidade do observador nos fótons da radiação cósmica de fundo

O dipolo discutido na seção anterior corresponde a uma modulação do mapa de temperaturas por um fator $\beta \cos \theta$ (em primeira ordem de v_{RCF}/c):

$$T_{\text{obs}}(\hat{n}_{\text{obs}}) = T_{\text{res}}(\hat{n}_{\text{res}})(1 + \beta \cos \theta), \quad (4)$$

onde θ é o ângulo entre a direção de observação e a velocidade peculiar de quem se move com relação aos fótons da RCF, $\cos \theta = \hat{n} \cdot \hat{v}_{\text{RCF}}$, e $\beta = v_{\text{RCF}}/c$. Chamamos de T_{res} e \hat{n}_{res} a temperatura e direção de emissão dos fótons no referencial onde a observadora está em repouso (Figura 2a). Com o dipolo medido pela colaboração Planck [6], cuja amplitude é $3362.08 \pm 0.99 \mu\text{K}$, estima-se que nos movemos com velocidade $v_{\text{RCF}} = 369.82 \pm 0.11 \text{ km/s}$ na direção $(l, b) = (264.021 \pm 0.011, 48.253 \pm 0.005)^\circ$, onde l e b são, respectivamente, a longitude e latitude em coordenadas galácticas.

Podemos entender esse fenômeno em termos de dois efeitos da relatividade restrita. O primeiro de-



(a) Observadora em repouso com relação ao referencial da radiação cósmica de fundo, i.e., os fótons estão isotropicamente distribuídos e possuem a mesma temperatura T_{obs} quaisquer que sejam as direções de observação \hat{n}_{obs} .

(b) Observadora se movendo com velocidade v_{RCF} com relação ao referencial da radiação cósmica de fundo. Os efeitos Doppler e de aberração são responsáveis pelo avermelhamento dos fótons apostos ao movimento e alteração nos ângulos, respectivamente.

Figura 2: Exemplo do efeito da velocidade de uma observadora nos fótons que são homogêneos e isotrópicos no referencial onde ela está em repouso. Isso define o referencial da RCF: subtrai-se o termo de dipolo a fim de se obter o referencial mais homogêneo e isotrópico possível.

les é o efeito Doppler na frequência dos fótons,

$$v_{\text{obs}} = v_{\text{res}} \frac{1 + \beta \cos \theta}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (5)$$

tal que, para $\beta \ll 1$,

$$v_{\text{obs}} \approx v_{\text{res}} (1 + \beta \cos \theta). \quad (6)$$

Ou seja, os fótons no extremo oposto (alinhados) à direção de movimento da observadora sofrem desvio para o vermelho (azul), o que diminui (aumenta) a temperatura. Esse efeito está representado na Figura 2b), onde a observadora possui velocidade v_{RCF} (por exemplo, com a amplitude e direção medidas pela colaboração Planck): fótons observados com uma linha de visada que se alinha à velocidade, $\cos(\theta = 0) = 1$, possuem máximo desvio para o vermelho, enquanto aqueles observados na direção oposta, $\cos(\theta = 180^\circ) = -1$, possuem o maior avermelhamento.

O segundo efeito é o de aberração nos ângulos,

$$d\Omega_{\text{obs}} = \frac{1 - \beta^2}{(1 + \beta \cos \theta)^2} d\Omega_{\text{res}}, \quad (7)$$

que faz ângulos sólidos observados $d\Omega$ parecerem menores na direção de propagação da observadora, portanto, uma convergência dos fótons. Considerando o termo de primeira ordem em β ,

$$d\Omega_{\text{obs}} = (1 - 2\beta \cos \theta) d\Omega_{\text{res}}. \quad (8)$$

Isso está representado na Figura 2b) através da maior concentração de fótons na direção do movimento da observadora e uma densidade menor de fótons no sentido oposto ao movimento (compare com a distribuição angular representada na Figura 2a).

Aplicando esses efeitos Doppler e de aberração na densidade numérica dos fótons da RCF,

$$n(v, \theta) = \frac{u(v) dv d\Omega}{h\nu} = \frac{2v^2}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}, \quad (9)$$

é possível demonstrar o resultado da Equação (4) [7].

1.2 Efeito da velocidade do observador nos fótons de fontes de rádio: a fórmula de Ellis-Baldwin

Dado que as observações de galáxias requerem a detecção de fótons, a contagem numérica desses objetos também é afetada pelo efeito Doppler e de aberração angular.

Suponha que a densidade de fluxo de fontes de rádio é uma lei de potências da forma

$$S(v_{\text{res}}) \propto v_{\text{res}}^{-\alpha}, \quad (10)$$

onde α é denominado índice espectral. Essa quantidade representa a potência dos fótons incidentes no detector, por unidade de área e de frequência, ou seja, $[S] = \text{W}/\text{m}^2/\text{Hz}$. Portanto, o efeito Doppler na frequência contribuirá como

$$S_{\text{obs}}(v_{\text{obs}}) = S_{\text{res}}(v_{\text{res}}) (1 + \beta \cos \theta)^{\alpha+1} \quad (11)$$

Finalmente, supondo que os fótons são emitidos isotropicamente pelas fontes,

$$\left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\text{res}} \propto S_{\text{res}}^{-x}, \quad (12)$$

temos que

$$\left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\text{obs}} = \left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\text{res}} (1 + \beta \cos \theta)^{x(1+\alpha)} \frac{d\Omega_{\text{res}}}{d\Omega_{\text{obs}}}, \quad (13)$$

de forma que, em primeira ordem em β ,

$$\left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\text{obs}} = \left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\text{res}} (1 + \mathcal{D}_{\text{EB}} \beta \cos \theta), \quad (14)$$

onde

$$\mathcal{D}_{\text{EB}} = 2 + x(1 + \alpha). \quad (15)$$

Este resultado foi obtido pela primeira vez por George Ellis e John Baldwin, em 1984 [8]. Note que, diferentemente da RCF, a modulação do dipolo depende das propriedades x e α das fontes, as quais foram tomadas como constantes para todos os redshifts.

Diferentes grupos [9–17] aplicaram a Equação (15) para extrair a velocidade relativa do dipolo medido através de levantamentos de fontes de rádio, com a conclusão de que a direção do dipolo é normalmente consistente com aquela obtida através da RCF, mas o módulo da velocidade peculiar é significativamente maior. Contudo, vale ressaltar que, além de fixar α e x em redshift, esses trabalhos não levam em conta a dispersão dos valores para diferentes objetos do catálogo utilizado, assumindo apenas um valor médio $\bar{\alpha}$ e \bar{x} para toda a amostra.

1.3 Efeitos de evolução das fontes com o redshift: uma alternativa à fórmula de Ellis-Baldwin

Em todos os resultados obtidos ao empregar a Equação (15), o dipolo é medido e então \mathcal{D}_{EB} é utilizado para extrair a velocidade peculiar através da Equação (14). No entanto, \mathcal{D}_{EB} não leva em conta nenhuma forma de informação radial (redshift): este fator pode ser pensado como uma projeção radial do dipolo tridimensional. Em termos do redshift, pode-se mostrar que [18, 19]

$$\mathcal{D}_{3\text{D}} = 2 + \frac{\mathcal{H}'(z)}{\mathcal{H}^2(z)} + \frac{2}{r(z)\mathcal{H}(z)} - \frac{5s(z)}{r(z)\mathcal{H}(z)} - b_e(z). \quad (16)$$

Os três primeiros termos à direita são puramente cosmológicos, r é a distância comóvel ao longo da

linha de visada, e os dois últimos termos contêm os vieses de magnificação (s) e evolução (b_e), os quais, assim como x e α , também dependem da amostra. De fato, x e s são a mesma quantidade, a menos de um fator multiplicativo:⁴

$$s = \frac{2}{5}x \quad (17)$$

O fator dipolo bidimensional pode ser então encontrado projetando a Equação (16) ao longo da direção radial [19]:

$$\mathcal{D} = \int_0^\infty dz f(z) \mathcal{D}_{3\text{D}}(z), \quad (18)$$

onde $f(z)$ é a densidade numérica de fontes normalizada, i.e., $\int dz f(z) = 1$ no intervalo de redshifts considerado para análise. Obtém-se então

$$\mathcal{D} = \mathcal{D}_{\text{cosmo}} + \mathcal{D}_{\text{mag}} + \mathcal{D}_{\text{evol}}, \quad (19)$$

onde

$$\mathcal{D}_{\text{cosmo}} = \int_0^\infty dz f(z) \left[2 + \frac{2}{r(z)\mathcal{H}(z)} + \frac{\mathcal{H}'(z)}{\mathcal{H}^2(z)} \right], \quad (20)$$

$$\mathcal{D}_{\text{mag}} = -2 \int_0^\infty dz f(z) \frac{x(z)}{r(z)\mathcal{H}(z)}, \quad (21)$$

$$\mathcal{D}_{\text{evol}} = - \int_0^\infty dz f(z) b_e(z). \quad (22)$$

Ou seja, o dipolo observado na contagem do número de quasares depende da distância entre o observador e a fonte. Aqui focamos no cálculo do dipolo como função do redshift, mas o mesmo poderia ser feito para outro indicador de distância (ver, por exemplo, [19]). Uma vez que diferentes formas de calcular a dependência até a distância das fontes são afetadas de maneiras diferentes pela velocidade do observador, ressaltamos que a conexão entre a Equação (15) e (19) não é trivial. Contudo, esta última permite um teste alternativo, com dependências sistemáticas distintas, daquele realizado por Ellis e Baldwin.

2 Função de luminosidade dos quasares

Como vimos na Seção 1.2, o dipolo cinético \mathcal{D} da contagem de objetos, Equação (19), depende do viés

⁴Não entraremos nos detalhes dessa derivação aqui. No entanto, sugerimos a leitura de [19].

de magnificação $s(z)$ e de evolução $b_e(z)$, quantidades que requerem conhecimento da densidade numérica $\bar{n}(z)$ dos objetos contidos na amostra [20]:

$$s(z, M_c) = \frac{\partial \log_{10} \bar{n}(z, M_c)}{\partial M_c}, \quad (23)$$

$$b_e(z, M_c) = -\frac{\partial \ln \bar{n}(z, M_c)}{\partial \ln(1+z)}, \quad (24)$$

onde M_c é a magnitude de corte, ou seja, o limite que o telescópio é capaz de observar. Objetos menos brilhantes do que esse corte não são observados por limitação instrumental.

Uma forma de determinar $\bar{n}(z)$ é através da função de luminosidade Φ , a qual descreve a abundância de objetos por intervalo de luminosidade L , ou magnitude absoluta M , e por volume comóvel V :⁵

$$dN = \Phi(M) dM dV = \Phi(L) d(-L) dV. \quad (25)$$

Portanto,

$$\bar{n}(z, M_c) = \int_{-\infty}^{M_c} dM \Phi(z, M) \quad (26)$$

é a densidade comóvel de objetos.

Traçando um paralelo com a Equação (9), vemos que a função de luminosidade Φ se propõe a descrever a distribuição de objetos no universo. Contudo, diferentemente do caso dos fótons, onde a distribuição é dada pela Lei de Planck, para galáxias, e outros objetos luminosos, a falta de uma descrição com base em princípios físicos fundamentais nos permite obter Φ apenas de forma empírica.⁶

Como mencionado na introdução, talvez a forma mais conhecida de observação na cosmologia é a detecção da luz emitida por estrelas, gás e poeira contidas em galáxias, sendo elas o traçador mais comum o campo de matéria escura do universo. Contudo, o buraco negro central de algumas galáxias é uma fonte de raios-X e raios- γ . Dizemos que, nesses casos, tais galáxias possuem um núcleo ativo (do inglês, *active galactic nuclei*, ou AGNs). Dependendo do ângulo de observação, o ANG recebe diferentes nomes, sendo um deles quasar, ou “objeto quase-estelar” (do inglês,

quasi-stellar object, ou QSOs), que será amplamente utilizado no que se segue. Esta denominação veio das primeiras observações na década de 1960 de objetos que pareciam pontuais como estrelas. Os quasares compõem a classe mais brilhante de núcleos ativos conhecida e, portanto, podem ser observados a grandes distâncias, sendo excelentes fontes para estudar cosmologia.⁷

Pela possibilidade de explorarmos enormes volumes do universo, a altos redshifts, com os quasares, consideraremos esses objetos como traçadores para estudarmos o teste do Princípio Cosmológico de interesse.

A FL pode ser obtida com levantamentos de quasares e galáxias através da detecção desses objetos em diferentes comprimentos de onda (e.g., no óptico, em rádio, infravermelho, raios-X e ultravioleta). Não entraremos em detalhes sobre como essas medidas são feitas, pois isso vai além do escopo deste trabalho, mas recomendamos a leitura de [23] e [24].

A contagem do número de quasares e galáxias tem duas fontes principais de incerteza: objetos muito brilhantes são raros e, portanto, difíceis de serem observados; já objetos menos brilhantes são difíceis de serem observados a altos redshifts e, portanto, tendemos a ter um elevado número de observação desses objetos no universo mais próximo. Isso afeta as incertezas na determinação da FL, de forma que ambas as extremidades brilhante e fraca de Φ são suscetíveis a grandes incertezas. Isso nos leva à adoção de uma lei de potência dupla adequada para a densidade espacial dos quasares [25–28]:

$$\Phi(z, M_g) = \frac{\Phi_*}{10^{0.4(a+1)(M_g - M_*)} + 10^{0.4(b+1)(M_g - M_*)}}. \quad (27)$$

Aqui, Φ_* é um fator de normalização relacionado à densidade numérica característica dos quasares, M_* é a magnitude característica (associada com a luminosidade característica), a e b descrevem, respectivamente, o comportamento das extremidades brilhantes e fracas, e

$$M_g(z) = m_g - \mu(z) - [K(z) - K(z=2)] \quad (28)$$

é a magnitude absoluta correspondente a magnitude aparente m_g observada na banda g corrigida pelo fator K [27, 29]:

$$K(z) = -2.5(1 + \alpha_v) \log_{10}(1+z), \quad \alpha_v \simeq -0.5. \quad (29)$$

⁷Veja [22] para uma revisão sobre o tema.

⁵O sinal negativo vem da relação entre magnitude e luminosidade: $M = -2.5 \log_{10} \left(\frac{L}{L_{\text{ref}}} \right) \Rightarrow dM = -\frac{2.5}{\ln 10} \frac{dL}{L}$.

⁶Para um trabalho interessante conectando a função de luminosidade com o modelo de halos, ver [21]. Apesar de se aproximar mais de uma derivação de primeiros princípios, o modelo de halos em si requer não é unificado e também requer ajustes empíricos baseados em observações e simulações.

Essa correção é aplicada às magnitudes observadas para levar em conta o fato de que as cores podem ser mais avermelhadas devido à expansão do universo, ou mais azuladas se os objetos possuírem a componente radial da velocidade peculiar em direção ao detector.

A densidade numérica dos quasares depende do redshift, mas não é um consenso como essa evolução ocorre. Podemos, portanto, considerar diferentes formas de evolução temporal da função de luminosidade. No que segue, mostrarei como diferentes modelos da função de luminosidade dos quasares impactam as estimativas teóricas do dipolo cinemático \mathcal{D} .

2.1 Modelos para a função de luminosidade

Exploraremos apenas os dois modelos para a função de luminosidade dos quasares, que estão descritos a seguir. Contudo, no trabalho original [5], são considerados mais quatro modelos para Φ .

2.1.1 Evolução na luminosidade (modelo PLE)

Neste modelo, a função de luminosidade evolui unicamente através de uma evolução em redshift na magnitude M_* [25, 29]:

$$M_*(z) = M_*(z_p) - 2.5 [k_1(z - z_p) + k_2(z - z_p)^2]. \quad (30)$$

Primeiros estudos mostraram uma preferência por esse modelo; contudo, dados que mapearam redshifts $z \gtrsim 2$ revelaram desvios do modelo para $z_p = 0$. Portanto, as inclinações das extremidades brilhantes e fracas podem variar para redshifts baixos ($z_l < z_p$) e altos ($z_h > z_p$), $a_{\{l,h\}}, b_{\{l,h\}}$, assim como k_1 e k_2 . Consideraremos o redshift pivô $z_p = 2.2$. Neste caso, temos 10 parâmetros livres que devem ser ajustados às observações: $\{a_l, b_l, a_h, b_h, k_{1,l}, k_{2,l}, k_{1,h}, k_{2,h}, M_*(z_p), \log_{10} \Phi_*\}$.

2.1.2 Evolução na densidade e luminosidade (modelo LEDE)

Consideramos também o caso em que tanto a luminosidade quanto a densidade numérica variam com o tempo: o chamado modelo Evolução da Luminosidade + Evolução da Densidade (LEDE) [28, 29]. Analisamos este caso particular motivado pelo fato de que a descontinuidade presente no redshift $z_p = 2.2$ é

removida, tornando as grandezas derivadas a partir de Φ contínuas e diferenciáveis.

As evoluções em densidade e magnitude consideradas são, respectivamente,

$$\log_{10} \Phi_*(z) = \log_{10} \Phi_*(z_p) + c_1(z - z_p) + c_2(z - z_p)^2 \quad (31)$$

e

$$M_*(z) = M_*(z_p) + c_3(z - z_p). \quad (32)$$

As extremidades brilhantes e fracas não evoluem em redshift neste caso: $a(z) = a, b(z) = b$. Portanto, este modelo possui 7 parâmetros livres: $\{a, b, c_1, c_2, c_3, \log_{10} \Phi_*(z_p), M_*(z_p)\}$.

2.2 Ajustando os modelos aos dados

Para encontrarmos os parâmetros dos modelos descritos na Seção 2.1, consideramos a maximização da verossimilhança \mathcal{L} para amostrar o espaço de parâmetros. Como a FL é estimada a partir da contagem do número de quasares dentro de cada intervalo de magnitude, seu erro pode ser aproximado como seguindo uma distribuição de Poisson. Sendo assim, [30]

$$\ln \mathcal{L} = \sum_{i,j} \frac{\Delta_{i,j}^2}{\sigma_{i,j}^2}, \quad (33)$$

Nesta equação, $\Delta_{i,j}^2 \equiv 1 - \Phi_\theta(z_i, M_j) / \Phi_{\text{obs}}(z_i, M_j) + \ln[\Phi_\theta(z_i, M_j) / \Phi_{\text{obs}}(z_i, M_j)]$, $\sigma_{i,j}^2 = 1 / N_{\text{obs}}(z_i, M_j)$, Φ_θ é dada pela Equação (27). Finalmente, Φ_{obs} e N_{obs} são, respectivamente, as medidas da FL e a média angular da contagem de quasares em cada intervalo de redshift centrado em z_i e magnitude M_j . Para maximizarmos a Equação (33), utilizamos o método de Monte Carlo via cadeias de Markov (MCMC) implementado no programa emcee [31] com a probabilidade a priori descrita para uma distribuição uniforme.

Na Figura 3, temos os melhores ajustes para a função de luminosidade dos quasares, obtidos a partir de 300000 cadeias de Markov da análise de Monte Carlo. Os dados foram extraídos da Tabela A.1 de [29], fazendo parte do programa *The Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey* do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS-IV/eBOSS). Os dados são compostos de oito intervalos de redshift, como pode ser visto nos diferentes painéis da figura.

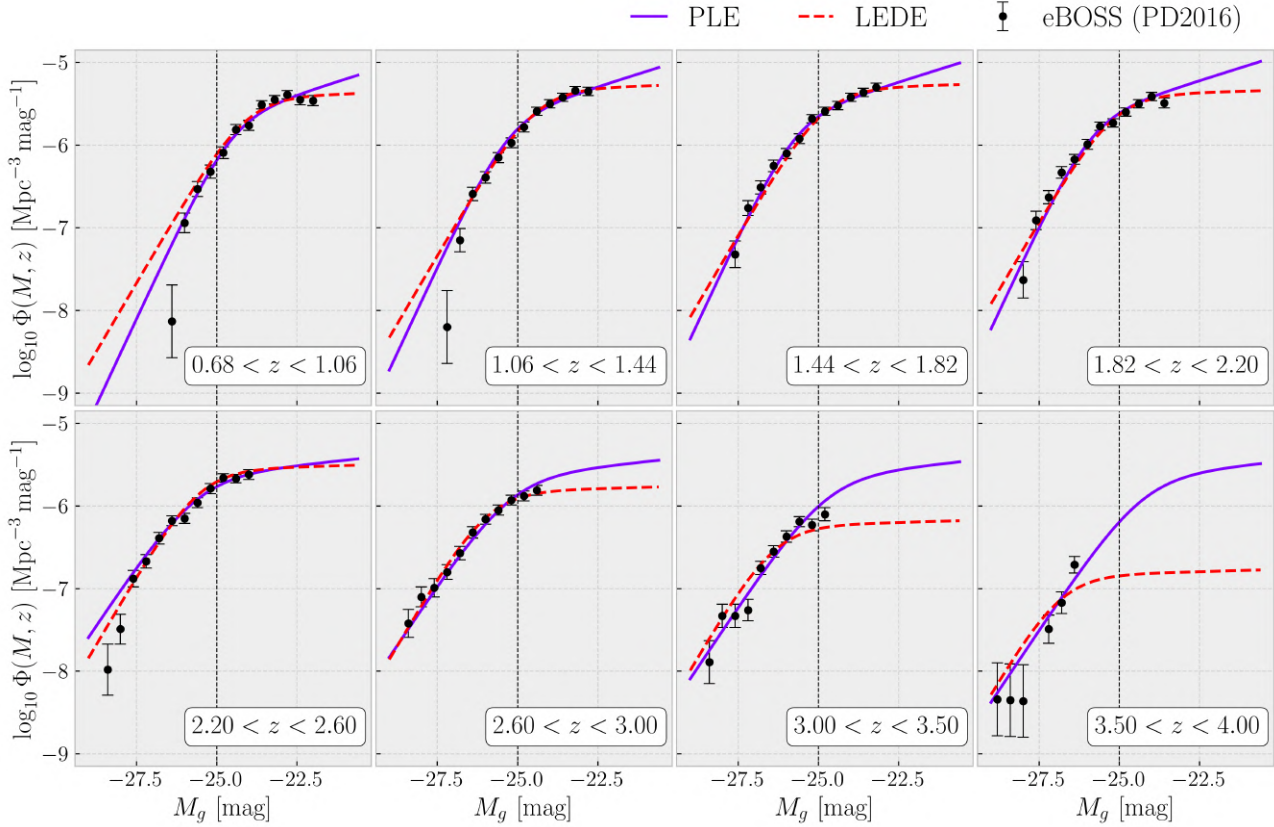


Figura 3: Os melhores ajustes para a função de luminosidade dos quasares (pontos com barras de erro) obtidas através do levantamento eBOSS [29]. Os parâmetros que melhor ajustam os modelos descritos na Seção 2.1 podem ser encontrados na referência original ([5]). A linha tracejada separa a região acima do corte de magnitude limite $M_c = -25$ para o último intervalo de redshift [20].

As linhas tracejadas marcam o corte em magnitude $M_c = -25$ para o último intervalo de redshift. Dados contidos à direita desse limite não serão incluídos nos resultados apresentados na próxima seção. Isso é feito para garantir a homogeneidade da amostra: apenas objetos com $M < M_c$ são incluídos na análise.

3 Propagando as incertezas da FL para o dipolo cinemático

Após obtermos as cadeias de Markov para as quantidades de interesse (mostradas na Figura 4), calculamos o dipolo cinemático esperado.

Na Figura 5, mostramos a amplitude esperada para a modulação dipolar $\mathcal{D}_{\nu_{\text{RCF}}}$ na contagem de quasares,

$$\left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\text{obs}} = \left(\frac{dN}{d\Omega}\right)_{\text{res}} \left(1 + \mathcal{D} \frac{v_{\text{RCF}}}{c} \cos \theta\right), \quad (34)$$

calculada através da Equação (19).

Vemos aqui o efeito de considerar os dois modelos aqui discutidos para calcular a amplitude do dipolo cinemático. Obtivemos o valor médio e a região de confiança de 1σ para um subconjunto de 5000 amostras. Finalmente, apresentamos como as linhas tracejadas o efeito de desprezar a evolução em redshift no cálculo da Equação (19), ou seja, tomando

$$s^{\text{eff}} = \int dz f(z) s(z), \quad (35)$$

e

$$b_e^{\text{eff}} = \int dz f(z) b_e(z). \quad (36)$$

Para o caso do modelo PLE, a amplitude é superestimada por mais de 3σ , enquanto que para o caso do modelo LEDE o resultado concorda dentro da região de 1σ .

4 Considerações finais

O princípio cosmológico implica que nossa velocidade peculiar é a mesma estimada através da dis-

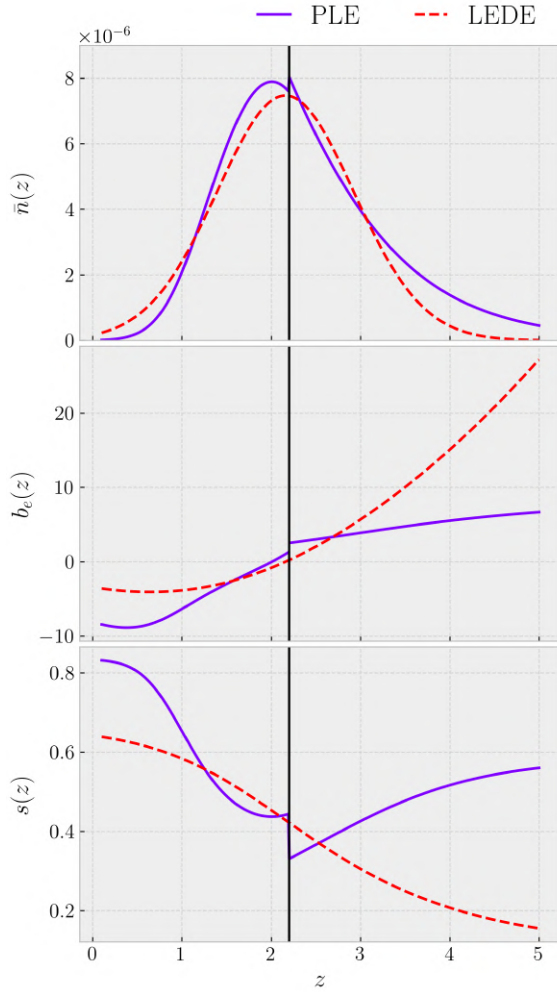


Figura 4: Densidade comóvel de quasares \bar{n} , bias de evolução b_e e magnificação s obtidos através dos modelos PLE e LEDE, com corte de magnitude $M_c = -25$ e assumindo o modelo Λ CDM com parâmetros $h = 0.679$, $n_s = 0.9681$, $\sigma_8 = 0.8154$, $\Omega_m = 0.3065$ e $\Omega_b h^2 = 0.02227$ [29]. A linha sólida vertical marca o redshift pivô, $z_p = 2.2$, necessário no modelo PLE e responsável pela descontinuidade das funções.

tribuição de matéria (galáxias, quasares, etc.) e do dipolo da radiação cósmica de fundo.

Trabalhos recentes têm sugerido uma tensão entre as estimativas dessa velocidade, sugerindo uma possível inconsistência com o princípio cosmológico. O trabalho que melhor quantificou essa tensão é [17], onde o valor obtido ao se utilizar a Equação 15 é da ordem de $\mathcal{D}_{\text{EB}} v_{\text{quasar}}/c \sim 10^{-2}$, em tensão de até 4σ com o valor esperado pela RCF: $\mathcal{D}_{\text{EB}} v_{\text{RCF}}/c \sim 10^{-3}$. Estes trabalhos fazem uso da expressão proposta por George Ellis e John Baldwin para calcular a velocidade com catálogos de quasares e fontes de rádio, sem levar em conta a evolução em redshift.

No entanto, correções que levam em conta a evo-

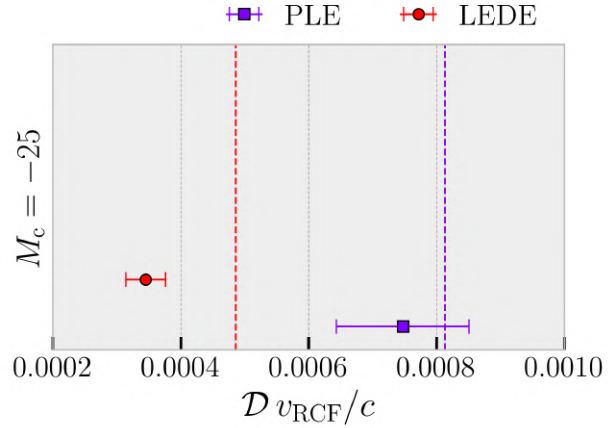


Figura 5: Vínculos de 1σ a amplitude do dipolo cinético dos quasares $\mathcal{D} v_{\text{RCF}}/c$ obtidos através de um subconjunto aleatório de 5000 amostras das cadeias de Markov. As linhas tracejadas são obtidas ao negligenciarmos a evolução em redshift dos vieses de magnificação e evolução (Equação 36). Neste caso, consideramos a projeção das funções de melhor ajuste para $\bar{n}(z)$, $s(z)$ e $b_e(z)$ (mostradas na Figura 4).

lução em redshift do dipolo cinemático podem ser relevantes para esse teste do Princípio Cosmológico. Essas correções envolvem quantidades que dependem da função de luminosidade dos objetos utilizados para o teste em questão. Assim, a evolução temporal desses objetos pode ser então calculada e usada para projetar o dipolo esperado na contagem de objetos.

Neste trabalho, observamos que as estimativas dependem do modelo escolhido para a função de luminosidade dos quasares. Uma consequência é a grande dispersão observada entre os dois modelos: obtemos uma previsão teórica para a amplitude do dipolo totalmente incompatível entre os modelos. Por fim, negligenciar a evolução temporal pode resultar em estimativas enviesadas para a amplitude teórica do dipolo \mathcal{D} (Equação 19) e, por conseguinte, da velocidade peculiar do sistema solar com relação ao referencial dos quasares.⁸

⁸Durante a revisão deste trabalho, o artigo [32] foi publicado no *arXiv* sugerindo que o teste de Ellis-Baldwin (Equação 15) é robusto à evolução em redshift. Frisamos aqui, contudo, que se o teste for feito através de análises tomográficas (em redshift), como proposto na Equação (16), então as incertezas aqui mencionadas devem ser abordadas. O teste em redshifts promove uma análise alternativa ao dipolo, sendo portanto uma forma de compreender se os resultados que estão em tensão com o Princípio Cosmológico são de origem física ou apenas um artefato sistemático.

Agradecimentos

A autora agradece à *UK Science & Technology Facilities Council consolidated grant ST/T000341/1* pelo apoio financeiro e aos seus coautores Jade Piat, Chris Clarkson e Roy Maartens. Agradecimentos especiais à Jade, que conduziu boa parte da pesquisa durante os seis meses do seu estágio de mestrado na Queen Mary University of London. Agradecimentos aos organizadores da segunda edição do evento *As Astrocientistas* e a Charles Dalang por inúmeras discussões.

Os seguintes programas e pacotes foram utilizados extensivamente neste trabalho: `emcee` [31], `CLASS` [33], `numpy` [34], `scipy` [35] e `matplotlib` [36].

Declaração de disponibilidade de dados

Os códigos utilizados neste artigo podem ser solicitados a autora para uso em pesquisa sem fins lucrativos.

Sobre a autora

Caroline Guandalin é uma cientista brasileira formada em Física pela Universidade de São Paulo (caroline.guandalin@roe.ac.uk). Seu mestrado e doutorado em Cosmologia, ambos na mesma instituição, concentraram-se na estrutura em grande escala do Universo, análise de levantamentos de galáxias e vínculos de não-Gaussianidades primordiais. Ela trabalhou como pesquisadora de pós-doutorado na Queen Mary University of London e, atualmente, é pesquisadora associada de pós-doutorado no Instituto para Astronomia (IfA) da Universidade de Edimburgo, localizado no Observatório Real. Ela também faz parte da colaboração Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI), um levantamento espectroscópico de galáxias que criou o maior mapa tridimensional do Universo até o momento.

Referências

- [1] A. H. Guth, *The Inflationary Universe: The quest for a new theory of cosmic origins* (Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1997), 1 ed.
- [2] M. Planck, *Sobre a lei de distribuição de energia no espectro normal*, Revista Brasileira de Ensino de Física **22**(4), 538 (2000). Disponível em https://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_538.pdf, acesso em jul. 2024.
- [3] J. Chluba et al., *New horizons in cosmology with spectral distortions of the cosmic microwave background*, *Experimental Astronomy* **51**(3), 1515 (2021).
- [4] O. A. R. Garcia, *Aberration and Doppler on the Cosmic Microwave Background: Kinematical and Intrinsic Effects*, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2016). Disponível em <https://pos.if.ufrj.br/wp-content/uploads/2021/08/Omar-Roldan-Garcia.pdf>, acesso em jun. 2024.
- [5] C. Guandalin et al., *Theoretical systematics in testing the Cosmological Principle with the kinematic quasar dipole*, *The Astrophysical Journal* **953**(2), 144 (2023).
- [6] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results-I. Overview and the cosmological legacy of Planck*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A1 (2020).
- [7] P. Peebles e D. T. Wilkinson, *Comment on the anisotropy of the primeval fireball*, *Physical Review* **174**(5), 2168 (1968).
- [8] G. Ellis e J. Baldwin, *On the expected anisotropy of radio source counts*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **206**(2), 377 (1984).
- [9] C. Blake e J. Wall, *Detection of the velocity dipole in the radio galaxies of the NRAO VLA sky survey* (2002). [ArXiv:0203385](https://arxiv.org/abs/0203385).
- [10] C. Gibelyou e D. Huterer, *Dipoles in the sky*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **427**(3), 1994 (2012).
- [11] M. Rubart e D. J. Schwarz, *Cosmic radio dipole from NVSS and WENSS*, *Astronomy & Astrophysics* **555**, A117 (2013).
- [12] P. Tiwari et al., *Dipole anisotropy in sky brightness and source count distribution in radio NVSS data*, *Astroparticle Physics* **61**, 1 (2015).

- [13] S. Ghosh et al., *Probing statistical isotropy of cosmological radio sources using Square Kilometre Array*, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **37**(4), 1 (2016).
- [14] J. Colin et al., *High-redshift radio galaxies and divergence from the CMB dipole*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **471**(1), 1045 (2017).
- [15] C. A. Bengaly, R. Maartens e M. G. Santos, *Probing the Cosmological Principle in the counts of radio galaxies at different frequencies*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2018**(04), 031 (2018).
- [16] N. J. Secrest et al., *A test of the cosmological principle with quasars*, *The Astrophysical Journal Letters* **908**(2), L51 (2021).
- [17] N. J. Secrest et al., *A challenge to the standard cosmological model*, *The Astrophysical Journal Letters* **937**(2), L31 (2022).
- [18] R. Maartens, C. Clarkson e S. Chen, *The kinematic dipole in galaxy redshift surveys*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2018**(01), 013 (2018).
- [19] C. Dalang e C. Bonvin, *On the kinematic cosmic dipole tension*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **512**(3), 3895 (2022).
- [20] M. S. Wang, F. Beutler e D. Bacon, *Impact of relativistic effects on the primordial non-Gaussianity signature in the large-scale clustering of quasars*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **499**(2), 2598 (2020).
- [21] N. Sabti, J. B. Muñoz e D. Blas, *New roads to the small-scale Universe: measurements of the clustering of matter with the high-redshift UV galaxy luminosity function*, *The Astrophysical Journal Letters* **928**(2), L20 (2022).
- [22] C. Q. A. Silva, *Identificação e redshifts fotométricos para quasares do tipo-I com sistemas de filtros de bandas médias e estreitas*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (2015). Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/td_e-06012016-185554/pt-br.php, acesso em jul. 2024.
- [23] R. Johnston, *Shedding light on the galaxy luminosity function*, *The Astronomy and Astrophysics Review* **19**(1) (2011).
- [24] C. Q. d. A. Silva, *Redshifts fotométricos de quasares em levantamentos de bandas estreitas*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (2021). Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/td_e-05032021-172936/pt-br.php, acesso em jul. 2024.
- [25] B. J. Boyle et al., *The 2dF QSO Redshift Survey—I. The optical luminosity function of quasi-stellar objects*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **317**(4), 1014 (2000).
- [26] S. M. Croom et al., *The 2dF QSO Redshift Survey—XII. The spectroscopic catalogue and luminosity function*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **349**(4), 1397 (2004).
- [27] S. M. Croom et al., *The 2dF–SDSS LRG and QSO survey: the QSO luminosity function at $0.4 < z < 2.6$* , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **399**(4), 1755 (2009).
- [28] N. P. Ross et al., *The SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey: the quasar luminosity function from data release nine*, *The Astrophysical Journal* **773**(1), 14 (2013).
- [29] N. Palanque-Delabrouille et al., *The extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Variability selection and quasar luminosity function*, *Astronomy & Astrophysics* **587**, A41 (2016).
- [30] L. Pozzetti et al., *Modelling the number density of H α emitters for future spectroscopic near-IR space missions*, *Astronomy & Astrophysics* **590**, A3 (2016).
- [31] D. Foreman-Mackey et al., *emcee: The MCMC Hammer*, *PASP* **125**, 306 (2013). [ArXiv:1202.3665](https://arxiv.org/abs/1202.3665).
- [32] S. von Hausegger, *The expected kinematic matter dipole is robust against source evolution* (2024). [ArXiv:2404.07929](https://arxiv.org/abs/2404.07929).

- [33] D. Blas, J. Lesgourgues e T. Tram, *The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS). Part II: Approximation schemes*, [Journal of Cosmology and Astroparticle Physics](#) **2011**(07), 034 (2011).
- [34] C. R. Harris et al., *Array programming with NumPy*, [Nature](#) **585**(7825), 357 (2020).
- [35] P. Virtanen et al., *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*, [Nature Methods](#) **17**, 261 (2020).
- [36] J. D. Hunter, *Matplotlib: A 2D graphics environment*, [Computing in Science & Engineering](#) **9**(3), 90 (2007).

Determinação espectroscópica da dispersão de velocidades de galáxias-lente e seu impacto na medida do parâmetro pós-Newtoniano

Ingrid Beloto¹, Eduardo Cypriano¹ e Martin Makler^{2,3}

¹Universidade de São Paulo

²Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

³Universidad Nacional de San Martín

Resumo

Este estudo se dedica a realizar medições precisas da dispersão de velocidades das galáxias lentes, utilizando dados obtidos pelo telescópio SOUTHERN Astrophysical Research (SOAR) durante o ano de 2022. A partir da análise de 10 espectros de galáxias, obtivemos estimativas fundamentais das suas dispersões de velocidade. Este trabalho oferece medições cruciais que serão utilizadas em colaboração com pesquisadores do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas para inferir o parâmetro pós-Newtoniano γ . Esta parceria visa aprimorar a precisão das futuras estimativas desse parâmetro, contribuindo significativamente para a compreensão das leis fundamentais da gravidade em escalas galácticas por meio do método de comparação de massas, ao comparar a massa dinâmica das lentes gravitacionais galácticas, independente de γ , com a massa obtida através da modelagem das lentes, a qual depende de γ .

Abstract

This study is dedicated to making precise measurements of the velocity dispersion of lens galaxies, using data obtained by the SOUTHERN Astrophysical Research (SOAR) telescope during the year 2022. From the analysis of 10 galaxy spectra, we obtained fundamental estimates of their velocity dispersions. speed. This work provides crucial measurements that will be used in collaboration with researchers at the Brazilian Center for Physical Research to infer the post-Newtonian parameter γ . This partnership aims to improve the accuracy of future estimates of this parameter, significantly contributing to the understanding of the fundamental laws of gravity on galactic scales through the mass comparison method, by comparing the dynamic mass of galactic gravitational lenses, independent of γ , with the mass obtained through lens modeling, which depends on γ .

Palavras-chave: Cosmologia, lenteamento, dispersão de velocidade, teste da gravidade

Keywords: Cosmology, lensing, velocity dispersion, test of gravity

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44957](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44957)

1 Introdução

No contexto da astrofísica contemporânea, as lentes gravitacionais galácticas surgem como uma ferramenta de investigação vital para compreender não apenas as propriedades das galáxias envolvidas, mas também para estudar a distribuição de massa no Universo. O campo gravitacional de uma distribuição de massa flexiona o caminho dos fótons ao distorcer o espaço-tempo. Esta distorção prevista por Einstein ganhou importância como uma ferramenta de estudo do Universo [1, 2]. Esses fenômenos gravitacionais dependem exclusivamente da distribuição de massa do objeto mais próximo, fornecendo assim informa-

ções sobre a massa da galáxia lente.

Neste contexto, a determinação precisa da dispersão de velocidade (σ_v) das galáxias lente, obtida por meio de espectros, emerge como uma iniciativa crucial. A combinação desses dados permite não apenas a compreensão da dinâmica estelar e distribuição de matéria nas galáxias, mas também a inferência do parâmetro pós-Newtoniano γ . Este parâmetro é fundamental na teoria da relatividade geral de Einstein e desempenha um papel crucial na verificação das previsões da gravitação de Einstein em comparação com teorias alternativas. A medida precisa de γ ajuda a explorar as possíveis violações da relatividade geral

e a entender melhor as interações gravitacionais em escalas galácticas e cósmicas. Por isso, a inferência de γ é um dos alvos do estudo em colaboração com o professor Martin Makler (do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF), onde os doutorandos Renan Alves de Oliveira e João Paulo França desempenham papéis fundamentais na seleção de alvos e na modelagem para a determinação da massa via lentes gravitacionais.

O método de comparação das massas utilizado para a inferência de γ já foi empregado anteriormente na literatura. [3] faz uma análise sobre os parâmetros que impactam mais na incerteza do resultado final de γ . Conclui-se que a incerteza na dispersão de velocidades das estrelas que pertencem as galáxias-lente está altamente correlacionada com a incerteza no valor de γ inferido. Utilizando os espectros coletados pelo *survey* SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) [4], com uma incerteza média de aproximadamente 10% do valor medido, [3] encontrou $\gamma = 1.01 \pm 0.05$.

O objetivo central deste projeto é a determinação da dispersão de velocidade de lentes gravitacionais galácticas com uma melhor precisão de aproximadamente 5% do valor inferido, a partir dos espectros obtidos com a fenda longa do espectrógrafo Goodman [5] do SOUTHERN Astrophysical Research (SOAR)¹ e, com esses dados estimar a massa dinâmica das galáxias.

Uma explicação mais detalhada sobre o método de comparação encontra-se na Seção 2. Na Seção 3 abordaremos a seleção e aquisição dos dados utilizados; os passos para a redução dos espectros obtidos é descrito na Seção 4; a inferência da dispersão de velocidades da amostra é apresentada na Seção 5. Por fim a Seção 6 conclui o estudo.

2 Comparação de massas

Para testar a Relatividade Geral em escalas galácticas, utilizaremos uma modificação da métrica de Schwarzschild, que descreve o espaço-tempo na presença de um corpo de massa M , introduzindo o parâmetro γ conforme a equação a seguir:

¹Based on observations obtained at the Southern Astrophysical Research (SOAR) telescope, which is a joint project of the Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI/LNA) do Brasil, the US National Science Foundation's NOIRLab, the University of North Carolina at Chapel Hill (UNC), and Michigan State University (MSU).

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \left(1 + \gamma \frac{2GM}{c^2 r} \right) dr^2 + r^2 d\phi^2 \quad (1)$$

O parâmetro γ será responsável por uma curvatura do espaço induzida pelo corpo com massa em adição a já prevista pela Relatividade Geral. Dessa forma, se $\gamma = 1$, recupera-se a métrica original (não modificada) de Schwarzschild.

2.1 Massa via lentes gravitacionais

Sistemas de lentes gravitacionais fortes entre galáxias ocorrem quando uma galáxia mais próxima, geralmente uma galáxia de tipo recente (*early-type*), desvia a luz de uma galáxia mais distante, criando imagens que podem ser observadas com arcos gravitacionais.

A distância aparente entre o centro da lente e o arco ou anel (chamado de anel de Einstein) é dada pelo raio de Einstein (θ_E). A densidade superficial de massa que provoca o efeito de lente gravitacional dentro deste raio angular é:

$$\Sigma_{crit} = \frac{c^2}{4\pi G} \frac{D_S}{D_L D_{LS}}, \quad (2)$$

onde D_L , D_S e D_{LS} são as distâncias de diâmetro angular da galáxia lente, da galáxia mais distante (chamada de fonte) e entre a lente e a fonte. Essas distâncias são determinadas a partir dos *redshifts* das galáxias e do modelo cosmológico adotado.

Usando a modificação da Relatividade Geral, o raio de Einstein é dado por:

$$\theta_E = \sqrt{\frac{1+\gamma}{2}} \left(\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_S D_L} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Portanto, a massa dentro do raio de Einstein, determinado pelo modelamento, pode ser inferida utilizando os *redshifts* de tal forma:

$$M(\theta_E) = \Sigma_{crit} \times \pi [\theta_E(\gamma) D_L]^2. \quad (4)$$

E então essa medida dependerá do parâmetro γ , já que está sujeita a luz que sofre a ação da gravidade.

2.2 Massa via dinâmica estelar

Outra forma de se estimar a massa de uma galáxia é através da dinâmica de suas estrelas. As velocidades

típicas de estrelas em galáxias de grande massa são de ordem não-relativísticas. Nesse caso a curvatura do espaço, e por consequência o parâmetro γ , não influenciam na medida da massa. Assim, comparando-se a medida de massa dinâmica com a obtidas por lentes gravitacionais, é possível estimar o parâmetro γ .

A dinâmica de um sistema gravitacional aproximadamente esférico, como galáxias elípticas, é dado pela equação de Jeans que pode ser escrita na forma:

$$M(r) = -\frac{\langle v_r^2 \rangle r}{G} \left[\frac{d \ln \rho}{d \ln r} + \frac{d \ln \langle v_r^2 \rangle}{d \ln r} + 2\beta \right], \quad (5)$$

onde r é a coordenada radial esférica a partir do centro da galáxia, ρ é densidade volumétrica de massa e $\beta \equiv 1 - \langle v_t^2 \rangle / \langle v_r^2 \rangle$ o parâmetro de anisotropia das órbitas, onde v_r são velocidade radiais e v_t velocidades tangenciais.

Essas grandezas se correlacionam com o observável, a dispersão de velocidades das estrelas ao longo da linha de visada, ponderado pelo brilho superficial, por

$$\sigma_z^2(R) = \frac{2}{I(R)} \int_R^\infty \left(1 - \beta \frac{R^2}{r^2} \right) \frac{v \langle v_r^2 \rangle r dr}{\sqrt{r^2 - R^2}}, \quad (6)$$

onde z e R são coordenadas no sistema cilíndrico, sendo que $r^2 = R^2 + z^2$ e $I(R)$, $v(r)$ os perfis de luminosidade projetado e tridimensional (desprojetado), respectivamente.

A dispersão de velocidades pode também ser inferida através da medida da largura das linhas de absorção observadas no espectro das galáxias fonte, já que tal dispersão causa o alargamento das linhas com os efeitos de *redshift* e *blueshift*. Através deste método é que iremos encontrar os valores de σ_v , visando diminuir a incerteza para impactar na inferência do parâmetro γ .

3 Dados

Concentramos nossas observações em galáxias do tipo precoce (*early-type*) dentro de sistemas de lentes gravitacionais galáxia-galáxia. A amostra foi selecionada a partir de uma compilação criada por Oliveira & Makler (em preparação), a qual inclui sistemas fortes de lentes gravitacionais observados por levantamentos de imagem. Essa seleção foi baseada em objetos que possuem valores de *redshift* medidos

tanto para a lente quanto para a fonte, bem como morfologias adequadas para modelagem. Esses critérios garantem a medição de massa por meio de lentes gravitacionais.

Os sistemas de lente forte foram observados utilizando o espectrógrafo Goodman [5] no modo de fenda longa com uma largura de 1" no telescópio SOAR (4 metros). Essas observações ocorreram durante duas campanhas: 4-5 e 8-9 de fevereiro (SO2022A-020) e 21-23 de setembro e 15 de outubro (SO2022B-018) de 2022. Uma grade de difração com 600 linhas/mm foi utilizada, proporcionando uma cobertura espectral de 6300 Å a 8930 Å. Essa configuração resultou em uma resolução de 1260 a 5500 Å.

No total, 21 galáxias foram observadas, sendo 11 adquiridas durante o primeiro semestre e 10 durante o segundo semestre de 2022. Neste trabalho analisaremos 10 das 11 observadas no primeiro semestre. A orientação da fenda foi escolhida para abranger as regiões mais brilhantes tanto das galáxias lentes quanto das fontes. A imagem de cada sistema observado pode ser vista na Figura 1.

4 Redução dos espectros

A redução dos dados espectroscópicos foi realizada utilizando o software IRAF² [8]. Este procedimento envolve uma série de etapas, que serão detalhadas abaixo:

- *Análise de arquivos*: Baixar os dados e reconhecer os arquivos de ciência, de correção e calibração;
- *Correção de bias*: Está ligado com o efeito que a voltagem de fundo da CCD (*charge-coupled device*) pode causar em nossas imagens. Para corrigir tal efeito, tira-se imagens com a câmera do telescópio fechada, assim teremos imagens apenas com a influência desta voltagem. No IRAF é possível fazer uma lista destes arquivos e combiná-los usando a função `zerocombine` no pacote `ccdred`. Esta imagem combinada deve ser subtraída dos arquivos de *flat fields*.

²IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatories, which are operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under a cooperative agreement with the National Science Foundation. <https://iraf-community.github.io/>

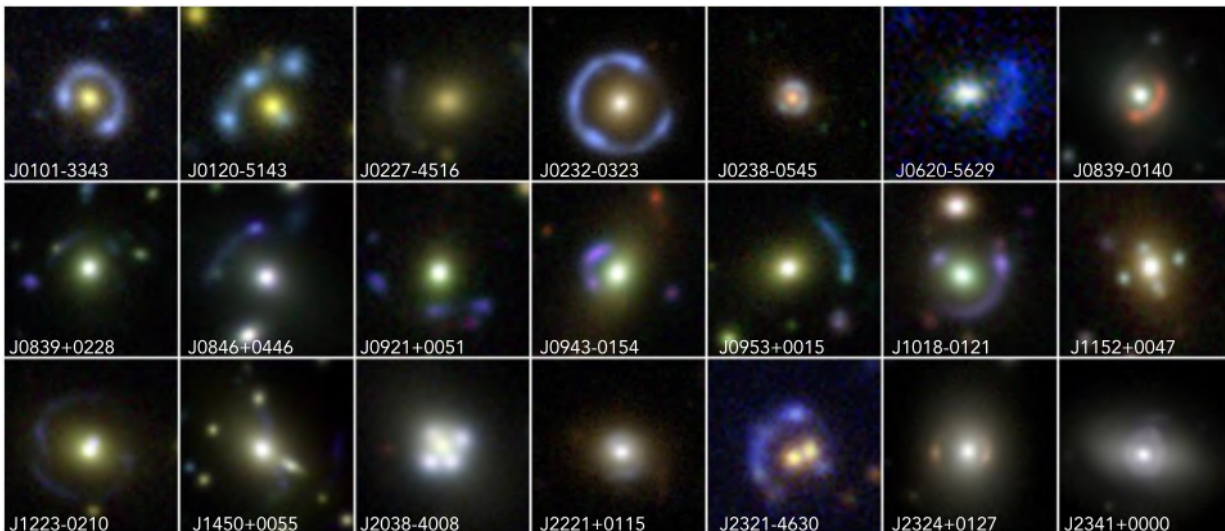


Figura 1: Dados de imagem ($20'' \times 20''$) do programa SOAR, obtidos como uma compilação dos levantamentos HSC [6] e DES [7] do banco de dados LaStBeRu.

- *Correção de flat field:* A câmera utilizada no telescópio terá uma variação de sensibilidade em cada pixel. Para corrigir este efeito, antes da observação são feitas imagens de uma área iluminada de forma homogênea. Assim como para o *bias*, os arquivos que contém os *flat fields* (com o *bias* já subtraído) devem ser combinados com a função `combine` e a imagem final é normalizada com a função `response` do pacote `specred`. O polinômio de Legendre de ordem 9 foi o que melhor ajustou o dado.
- *Aplicar correções:* O *bias* deve ser subtraído das imagens de ciência e estas imagens divididas pelo *flat*, além de ser necessário cortar as imagens de forma a ter apenas a área com contribuição de fótons. Estas três tarefas são executadas utilizando a função `ccdproc`. Depois, deve-se selecionar as imagens referente a um objeto, analisá-las usando o *software SAOImage DS9*³ com a opção `blink` para concluir se há um desvio entre as imagens de cada exposição. Em caso positivo, usando a função `imshift` é possível deslocar as imagens para poder combinar com a imagem referência.
- *Remoção de raios cósmicos:* Nas exposições de 15 minutos, os raios cósmicos irão interferir na obtenção do espectro, deixando rastros na imagem. Foi necessário o uso de um algoritmo robusto para a remoção de tal efeito, no qual

selecionou-se o LACosmic⁴ (*Laplacian Cosmic Ray Identification*) [9] em python, que faz uso de métodos Laplacianos para identificar e remover os raios.

- *Combinar imagens:* Depois da correção, as imagens do mesmo objeto devem ser colocadas em uma lista para serem combinadas com a função `combine`. Com a combinação, a razão sinal-ruído irá aumentar.
- *Calibração em comprimento de onda:* Os dados utilizados estão em função dos números de pixels da imagem. Para alterar o eixo x para comprimento de onda, é necessário antes de fazer a observação, obter o espectro de emissão de uma lâmpada do observatório em questão. Com esse espectro, identifica-se cada linha com seu respectivo comprimento de onda utilizando a função `identify` do pacote `longslit`. A lâmpada utilizada do SOAR foi a de HgArNe, e a identificação pode ser feita com o espectro de comparação disponibilizado no site do Goodman.⁵ Após esta identificação, a função `reidentify` é utilizada para aplicar nas outras linhas da imagem e a função `fitcoords` para encontrar uma função geral que se ajuste aos dados. Por fim, através da função `transform` é possível aplicar a calibração nos espectros de ciência.

³<https://sites.google.com/cfa.harvard.edu/saomageds9>

⁴<http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>

⁵https://soardocs.readthedocs.io/projects/lamps/en/latest/plots_600.html#red

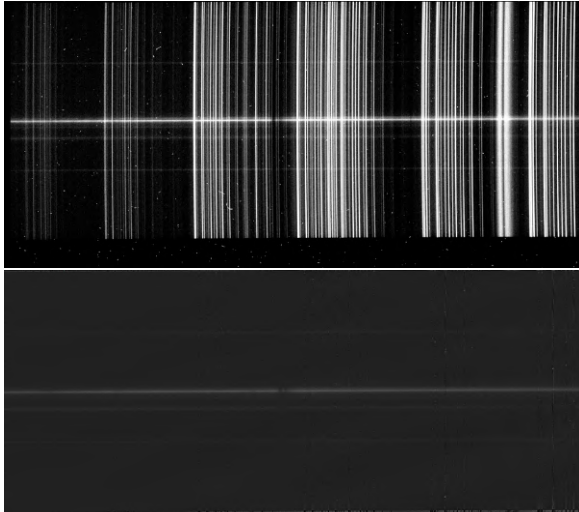


Figura 2: Comparação das imagens de ciência do objeto J0839-0140 antes (imagem superior) e depois (imagem inferior) das correções aplicadas.

- *Remoção da emissão de fundo:* Na imagem de ciência há emissões de fundo do céu, e estas emissões devem ser retiradas do dado. Isto é feito através do comando `background`, que ajusta uma função para remover as linhas. A ordem do polinômio ajustado pode ser diferente para cada amostra, por isso é necessário ajustar ordens diversas e analisar qual resultado terá um erro quadrático médio de menor valor. Os valores para a ordem variam de 3 a 9. A Figura 2 contém a imagem combinada das exposições da galáxia J0839-0140 antes e depois das correções.
- *Extração espectro:* Feito todas as correções, pode-se extrair o espectro de uma dimensão da imagem. Para tal, usa-se a função `apall` do pacote `apextract`, onde é possível selecionar uma abertura onde há a contribuição do espectro. Em alguns casos o mesmo pode ser feito para o espectro do arco quando visível na imagem. Podemos ver um exemplo na Figura 3.
- *Calibração em fluxo:* O eixo y do espectro está em ADUs (*Analog-digital Unities*), e para converter este para fluxo, durante as observações é necessário observar também uma estrela padrão, que é uma estrela com fluxo conhecido. Deve-se então refazer os passos para o espectro da estrela (calibrações, correções e combinações). No IRAF há bibliotecas com os fluxos de algumas estrelas padrão. Identificando a biblioteca

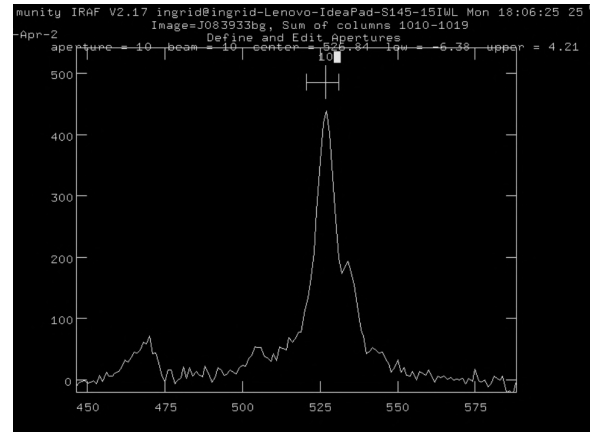


Figura 3: Exemplo da seleção de abertura para o espectro da galáxia J0839-0140.

com o modelo da estrela observada, através da função `standard` o fluxo é relacionado com o espectro. A função `sensfunc` irá atribuir uma função para a calibração do fluxo e aplicando o comando `calibrate` sobre o espectro da galáxia, obtém-se a calibração desejada.

- *Remoção de linhas telúricas:* As linhas telúricas representam absorção por elementos da atmosfera. Esta absorção estará presente nos espectros da galáxia mas não são contribuições dela. Por isso, é desejável retirá-la do espectro. Com este objetivo, utiliza-se o espectro da estrela padrão (que também terá linhas telúricas), normalizando seu contínuo para 1 e, usando uma rotina, todo o espectro é convertido para 1 exceto nas linhas telúricas. É possível por fim fazer uma função que multiplicará o espectro da galáxia analisada por este que há apenas contribuição das linhas telúricas. Defini-se a função `telluric` na qual pode-se analisar o fator de multiplicação afim de remover as linhas do espectro estudado (Figura 4).

Este procedimento foi aplicado nas 10 galáxias observadas no primeiro semestre.

5 Dispersão de velocidades

Usando os 10 espectros observados no primeiro semestre devidamente reduzidos e calibrados, podemos determinar a dispersão de velocidades das estrelas dentro da galáxia lente. Isso é obtido através da análise da largura das linhas de absorção presentes nos espectros das galáxias examinadas, pois essas

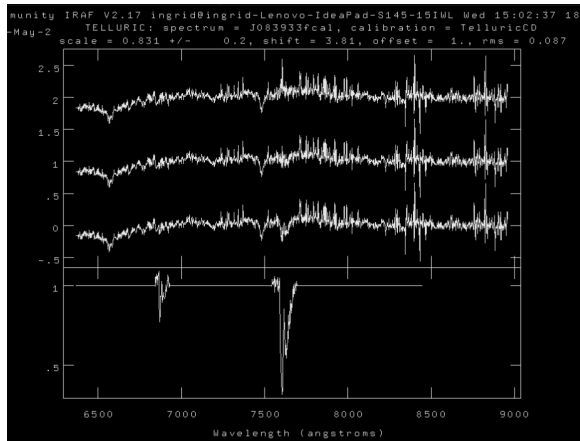


Figura 4: Remoção das linhas telúricas utilizando a função telluric criada. Percebe-se que o espectro do meio nos dá o melhor fator para retirar as linhas indesejadas.

linhas sofrem tanto efeitos de desvio para o vermelho quanto para o azul que resultam em alargamento. Para esse propósito, utilizamos o código pPXF (*Penalized Pixel-Fitting*) [10], que emprega modelos teóricos de espectros e compara suas combinações lineares com o espectro analisado para identificar o melhor ajuste.

Para inferir o valor da dispersão de velocidades, o código gera um espectro convolucionando um espectro modelo com uma distribuição de velocidade parametrizada ao longo da linha de visão. Essa distribuição é geralmente bem representada por uma Gaussiana e, dentro desse código, é expandida parametricamente como uma série de Gauss-Hermite. Neste trabalho empregamos a biblioteca de modelos E-MILES⁶ de [11].

Na apresentação deste projeto, 10 dos espectros observados no primeiro semestre foram reduzidos e suas dispersões de velocidade foram inferidas. Os resultados obtidos através do código pPXF são fornecidos na Tabela 1.

6 Conclusão

O estudo da dispersão de velocidades de galáxias-lente apresentou resultados promissores na busca pela determinação precisa do parâmetro pós-newtoniano γ em escalas galácticas. Utilizando espectros obtidos durante observações conduzidas no telescópio SOAR, foi possível extrair informações sobre a dinâmica estelar desses sistemas.

⁶<http://miles.iac.es/>

Galáxia	z	S/N	σ_v (km/s)
J0839-0140	0.27	22	288±15
J0839+0228	0.43	24	301±13
J0846+0446	0.24	18	269±21
J0921+0051	0.49	6	201±51
J0943-0154	0.45	13	412±32
J0953+0015	0.57	13	307±37
J1018-0121	0.39	16	291±21
J1152+0047	0.47	15	217±24
J1223-0210	0.44	13	411±39
J1450+0055	0.42	16	384±31

Tabela 1: Tabela contendo os resultados dos ajustes dado pelo pPXF, onde z é o *redshift*, S/N a razão sinal-ruído e σ_v a dispersão de velocidades encontrada.

Os resultados preliminares forneceram dispersões de velocidades confiáveis para a amostra estudada no primeiro semestre, permitindo a inferência da massa dinâmica das galáxias-lente. A técnica de comparação das massas, independente de γ , com aquelas obtidas por modelagem, dependente de γ , destaca-se como uma abordagem eficaz na busca pela determinação precisa deste parâmetro.

Os valores encontrados para a dispersão de velocidades, apresentados na Tabela 1, proporcionam uma base para futuras análises e comparações. Ainda assim nota-se que nem todos os valores encontrados atingiram uma incerteza em torno de 5% do valor medido. Este fato será analisado e explorado melhor após a redução completa da amostra.

O caminho futuro deste trabalho envolverá a análise e interpretação dos dados do segundo semestre e a comparação das massas obtidas, proporcionando uma visão mais abrangente do parâmetro γ em escalas galácticas.

Sobre a autora

Ingrid Beloto (ingridbeloto@usp.br) é uma astrônoma formada pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas-USP. Atualmente é mestranda no IAG, onde estuda a matéria escura e luminosa de lentes gravitacionais galácticas. Já trabalhou com Deep Learning e populações estelares e

está envolvida em diversos projetos de divulgação científica com o atendimento ao público e por meio de ilustrações nas redes sociais.

Sobre os autores

Eduardo Cypriano (eduardo.cypriano@iag.usp.br) é atualmente Professor Associado departamento de Astronomia do IAG-USP. Possui graduação em Bacharelado em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo, mestrado e doutorado em Astronomia pelo IAG-USP. Realizou pós-doutorado na University College London e foi astrônomo residente junto ao telescópio SOAR. Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Astrofísica Extragaláctica, atuando principalmente nos seguintes temas: aglomerados de galáxias, lentes gravitacionais, cosmologia observacional.

Martin Makler (martinmakler@gmail.com) possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutorado em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Atualmente é Pesquisador Titular II do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Tem experiência nas áreas de Astronomia e Física, com ênfase em Cosmologia, atuando principalmente nos seguintes temas: lentes gravitacionais, aglomerados de galáxias, energia e matéria escuras, formação de estruturas em grandes escalas e processamento de imagens de CCD. Também tem forte atuação na área de divulgação e popularização científica.

Referências

- [1] A. Einstein, *Physics and Reality*, *Journal of the Franklin Institute* **221**, 349 (1936).
- [2] L. J. King et al., *A complete infrared Einstein ring in the gravitational lens system B1938+666.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **295**, L41 (1998).
- [3] J. Schwab, A. S. Bolton e S. A. Rappaport, *Galaxy-scale strong lensing tests of gravity and geometric cosmology: Constraints and systematic limitations*, *The Astronomical Journal* **708**, 750 (2010).
- [4] Abdurro'uf et al., *The Seventeenth Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: Complete Release of MaNGA, MaStar, and APOGEE-2 Data*, *The Astrophysical Journal Supplement* **259(2)**, 35 (2022).
- [5] J. C. Clemens, J. A. Crain e R. Anderson, *The Goodman spectrograph*, *Proceedings SPIE* **5492**, 331 (2004).
- [6] H. Aihara et al., *Third data release of the Hyper Suprime-Cam Subaru Strategic Program*, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **74**, 247 (2022).
- [7] Dark Energy Survey Collaboration et al., *The Dark Energy Survey: more than dark energy - an overview*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **460**, 1270 (2016).
- [8] D. Tody, *IRAF in the Nineties*, in *Astronomical Data Analysis Software and Systems II*, editado por R. J. Hanisch, R. J. V. Brissenden e J. Barnes (1993), vol. 52 de *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 173.
- [9] P. G. van Dokkum, *Cosmic-ray rejection by Laplacian edge detection*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **113**, 1420 (2001).
- [10] M. Cappellari, *Improving the full spectrum fitting method: accurate convolution with Gauss-Hermite functions*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **466**, 798 (2017).
- [11] A. Vazdekis et al., *UV-extended E-MILES stellar population models: young components in massive early-type galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **463**, 3409 (2016).

Estudo do gás difuso ionizado em galáxias edge-on

Janayna de Souza Mendes e Natalia Vale Asari

Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

Um dos principais componentes de uma galáxia é o gás, que pode ser encontrado em diferentes densidades e ionizado por diferentes fontes. O gás difuso ionizado (DIG) extraplanar, aquele com menor densidade localizado fora do plano, ainda não tem suas principais fontes de ionização bem compreendidas, sendo este o objetivo deste estudo. Utilizando dados de espectroscopia de campo integral de oito galáxias vistas de lado obtidos com o instrumento *Multi-Unit Spectroscopic Explorer* no *Very Large Telescope* (MUSE/VLT), analisamos o comportamento das razões de linhas de emissão em função da distância z ao plano galáctico. Nosso objetivo é investigar duas principais fontes de ionização do DIG extraplanar: escape de radiação proveniente de regiões com formação estelar, e estrelas quentes evoluídas de baixa massa (HOLMES, do inglês *Hot Low-Mass Evolved Stars*). Dentre a nossa amostra, fizemos uma análise preliminar do DIG extraplanar da galáxia ESO157-49. Os valores de largura equivalente de $H\alpha$ deste objeto caem com a distância ao plano, indicando que o escape de fótons tem um papel menor nessa região. Além disso, razões de linhas como $[N II]/H\alpha$ e $[S II]/H\alpha$ aumentam para grandes alturas, e se aliadas a elevados valores de $[O III]/H\beta$, sugere a existência de fontes ionizantes mais duras tais como as HOLMES. Para quantificar a contribuição de cada uma das fontes ionizantes propostas, compararemos nossas medidas observacionais de linhas de emissão com modelos teóricos de fotoionização.

Abstract

One of the main components of a galaxy is gas, which can be found in different densities and ionized by different sources. The extraplanar diffuse ionized gas (DIG), the one with the lowest density located outside the plane, does not yet have its main sources of ionization well understood, which is the objective of this study. Using full-field spectroscopy data from eight edge-on galaxies obtained with the *Multi-Unit Spectroscopic Explorer* instrument on the *Very Large Telescope* (MUSE/VLT), we analyze the behavior of emission line ratios in function of the distance z to the galactic plane. Our objective is to investigate two main sources of ionization in the extraplanar DIG: escaping radiation from regions with star formation, and hot low-mass evolved stars (HOLMES). Among our sample, we carried out a preliminary analysis of the extraplanar DIG of the galaxy ESO157-49. The $H\alpha$ equivalent width values of this object fall with distance from the plane, indicating that photon escape plays a smaller role in this region. Furthermore, line ratios such as $[N II]/H\alpha$ and $[S II]/H\alpha$ increase to great heights, and if combined with high values of $[O III]/H\beta$, suggests the existence of harder ionizing sources such as HOLMES. To quantify the contribution of each of the proposed ionizing sources, we will compare our observational measurements of emission lines with theoretical models of photoionization.

Palavras-chave: astrofísica, fotoionização, gás difuso ionizado

Keywords: astrophysics, photoionization, diffuse ionized gas

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44959](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44959)

1 Introdução

Galáxias são corpos extensos e muito luminosos, formados essencialmente por gás, poeira e estrelas. De acordo com o esquema de Hubble [1,2] para classificação morfológica, podemos separá-las em três tipos: irregulares, elípticas e espirais. Estas últimas têm como principal característica a presença de braços espirais em seu disco, região esta que possui uma maior densidade de gás e poeira. Quando vistas de frente no céu (em inglês, *face-on*), como no desenho

esquemático inferior da Figura 1, podemos ver claramente a estrutura formada pelos braços espirais. No entanto, quando vemos tais objetos posicionados de lado (em inglês, *edge-on*), não conseguimos observar estas estruturas, mas destaca-se o seu extenso e fino disco, como visto no desenho superior da Figura 1. Assim, para analisarmos o comportamento de alguns parâmetros físicos com relação à distância ao disco, observamos galáxias espirais vistas de lado.

O principal componente do meio interestelar é o gás, composto predominantemente por hidrogênio

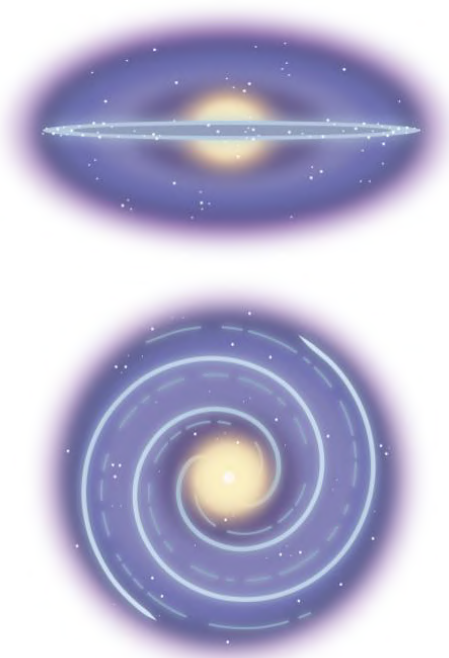


Figura 1: Esquema ilustrativo representando a forma de uma galáxia espiral quando vista no céu por diferentes linhas de visada: De cima para baixo, temos a galáxia espiral vista de lado (em inglês *edge-on*) e de frente (em inglês *face-on*), respectivamente. Em amarelo temos a região do bojo, em azul claro, estrutura do disco (acima) e dos braços espirais (abaixo), e em roxo, do halo da galáxia. Imagens: NASA [3] [4]

(aproximadamente 91%), hélio (9%) e demais elementos (0.1%) [5], e pode ser encontrado em diferentes densidades e temperaturas ao longo da galáxia. Considerando especialmente o gás morno ionizado, podemos dividi-lo em duas principais fases de diferentes densidades: regiões de formação estelar, intituladas de regiões H II, que estão localizadas no disco ao longo dos braços espirais – apresentam maior densidade e maior presença de poeira, contendo em seu interior principalmente estrelas jovens; regiões menos densas, intituladas de gás difuso ionizado (DIG, do inglês *diffuse ionized gas*), que não estão restritas ao disco – podem ser encontradas entre os braços espirais (e.g. Zurita et al. [6]) ou na região extraplanar [7], e são permeadas por estrelas mais velhas. Na Figura 2, temos uma analogia entre dois tipos de nuvens da atmosfera terrestre com diferentes densidades (cumulus e cirrus) e as regiões H II e de DIG presentes na galáxia NGC1566.

Para entender a diferença entre estrelas jovens e velhas na ionização do meio interestelar, é necessário compreender como algumas propriedades variam

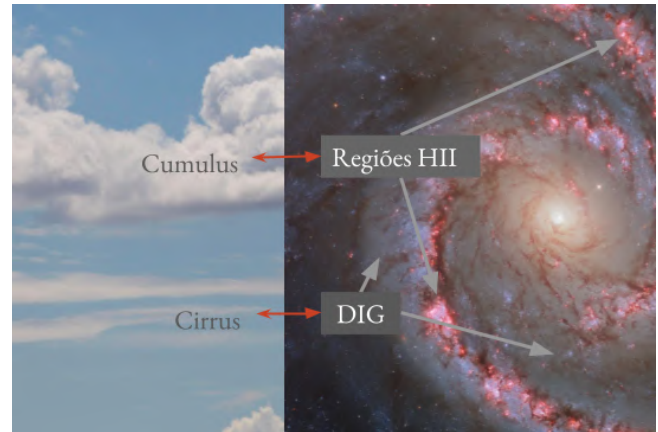


Figura 2: Analogia entre regiões de maior e menor densidade em uma galáxia (regiões H II e DIG, respectivamente) com nuvens da atmosfera terrestre (cumulus e cirrus, respectivamente). Imagens: Freepik.com [8] (à esquerda), ESA/Hubble & NASA, D. Calzetti, LEGUS team, R. Chandar [9] (à direita).

em diferentes estágios da evolução de uma estrela, desde o momento em que esta é formada até a sua morte. Assim, dada as condições iniciais necessárias, a partir de nuvens densas e frias de gás e poeira formam-se o que conhecemos como aglomerados de estrelas, devido ao efeito da atração gravitacional. Nestes aglomerados, estrelas de mesma composição química mas com diferentes massas iniciais são formadas, sendo este último parâmetro o que ditará como será a evolução de cada uma delas. Isto porque algumas propriedades como temperatura e luminosidade estão estritamente relacionadas com sua massa inicial e o estágio evolutivo em que se encontra. Estrelas que nasceram de uma mesma nuvem de gás e ainda estão no início de suas vidas vão pertencer ao grupo da sequência principal, em que permanecerão por um longo período de tempo. Em especial, as estrelas mais quentes e luminosas pertencentes a esse grupo, chamadas de estrelas tipo OB, se formam em menor quantidade e são também as mais massivas, deixando este estágio mais rapidamente. Já estrelas de baixa massa, quando evoluem e caminham para seus estágios finais, se tornam nebulosas planetárias, para, enfim, se tornarem anãs brancas. Objetos que se encontram nesses últimos estágios são denominadas HOLMES (do inglês *HOt Low-Mass Evolved Stars*) [10] [11]: são mais quentes que as estrelas OB, sendo assim responsáveis pela emissão de fótons muito energéticos, e são muito abundantes no Universo. Também são encontradas fora das regiões H II, povoando a região extraplanar das galáxias, onde não há presença significativa de estrelas jovens.

Sendo assim, uma das possíveis formas de se ionizar o meio interestelar é a partir da emissão de fótons ionizantes por estrelas. É sabido, por exemplo, que as estrelas OB são as principais responsáveis pela ionização das regiões H II, por estarem localizadas majoritariamente no interior dessas regiões. No entanto, para o DIG extraplanar não há ainda um consenso: Apesar de também ser considerada uma possível fonte ionizante o escape de fótons vindos do interior das regiões de formação estelar, somente isso não é suficiente para explicar o que é observado. Assim, nossa proposta é de que a fonte de ionização do DIG extraplanar seja uma combinação de escape de fótons emitidos por estrelas jovens e quentes juntamente da ionização por estrelas HOLMES. Para isso, vamos analisar uma amostra de galáxias espirais vistas de lado e comparar os dados observacionais com modelos de fotoionização desenvolvidos por Flores-Fajardo et al. [10], a fim de quantificar a contribuição dessas duas possíveis fontes ionizantes do DIG.

2 Processamento de dados

Para esta análise, contamos com oito galáxias observadas pelo instrumento MUSE (*Multi-Unit Spectroscopic Explorer*) [12] (Figura 3) no *Very Large Telescope*, um dos telescópios pertencentes ao ESO (*European Southern Observatory*). Obtidos por Comeron et al. [13], estes dados já se encontram públicos e reduzidos, e tratam-se de espectroscopia de campo integral, conhecidos como cubo de dados – para cada coordenada espacial do objeto temos um espectro na faixa da luz visível (4750 a 9300 Å), como ilustra a Figura 4.

O espectro observado é resultado da emissão de luz de tudo o que compõe as galáxias; no entanto, estamos interessadas apenas na contribuição do gás. Para isso, utilizamos o código STARLIGHT [15], um programa que utiliza do método Markov Chain Monte Carlo para realizar a síntese de população estelar, identificando assim a contribuição espectral proveniente das estrelas para que possamos, enfim, obter apenas a contribuição nebulosa. Na Figura 5, temos o espectro observado, sintético (após passar pelo STARLIGHT) e residual (diferença entre o observado e o sintético) em preto, amarelo e roxo, respectivamente, para o píxel (50, 50) da galáxia ESO469-15.

Com a síntese de população estelar, obtemos algumas informações que, juntamente com o espectro ob-

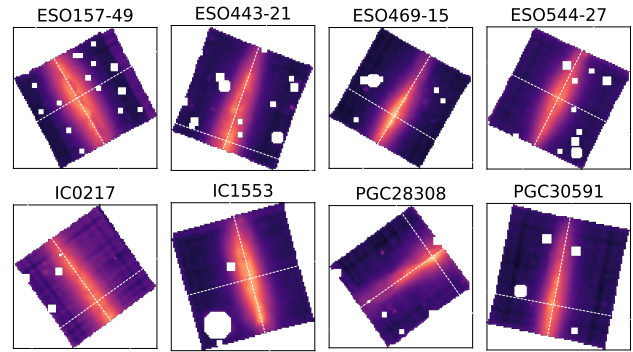


Figura 3: Mapa do fluxo no comprimento de onda 5635 Å de cada uma das galáxias da amostra. Os espaços em branco são objetos não pertencentes à amostra que foram mascarados, e as linhas tracejadas brancas indicam a posição dos eixos paralelo e perpendicular ao plano de cada galáxia.

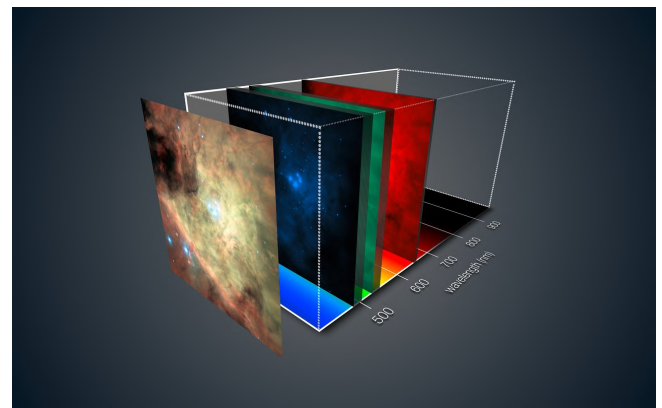


Figura 4: Representação esquemática de um cubo de dados do MUSE. No esquema, temos a imagem da nebulosa de Orion à esquerda, e sua decomposição em diferentes comprimentos de onda (em nm) à direita. Imagem: ESO/MUSE consortium/R. Bacon/L. Calçada [14]

servado, nos ajudam a identificar alguns objetos presentes no cubo não pertencentes às galáxias da amostra, tais como estrelas da Via Láctea e outras galáxias, sendo necessário mascará-los. Por fim, finalizamos a preparação dos dados para a análise realizando a medida do fluxo das linhas de emissão de nosso interesse com o programa DOBBY [16]. Os modelos de fotoionização utilizados foram feitos por Flores-Fajardo et al. [10], utilizando o código CLOUDY [17], e estão incluídos na *Mexican Million Models database* [18]. Os modelos utilizados foram feitos para a galáxia NGC891, sendo talvez necessário adaptá-los para a nossa amostra, e em sua elaboração foram consideradas duas fontes ionizantes: estrelas OB e HOLMES.

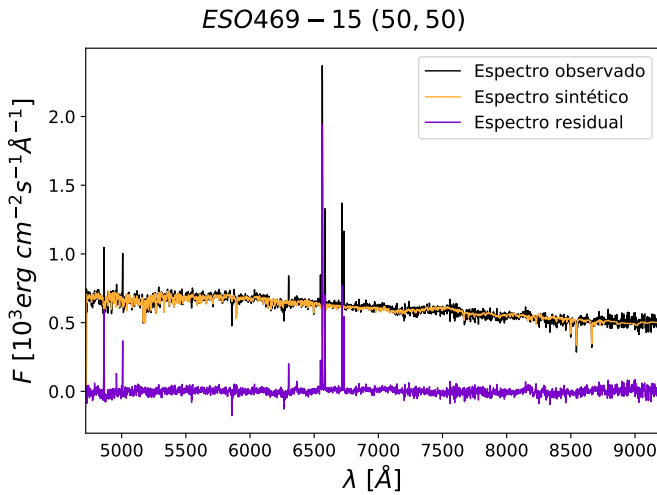


Figura 5: Fluxo F ($10^3 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$) por comprimento de onda λ (\AA). Em preto, amarelo e roxo temos, respectivamente, os espectros observado, sintético e residual para o píxel (50, 50) da galáxia ESO469-15.

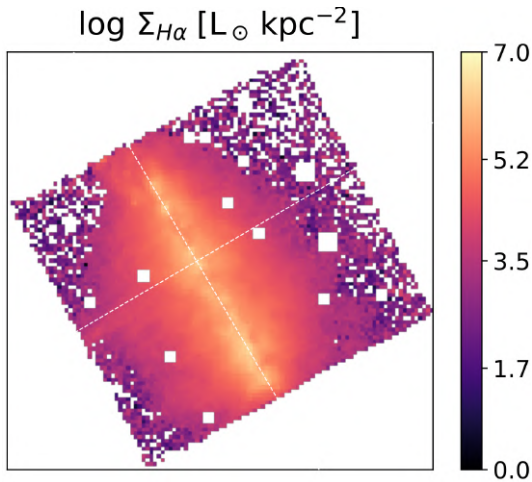


Figura 6: Mapa da densidade superficial de $\text{H}\alpha$ para a galáxia ESO157-49.

3 Resultados preliminares

A seguir, serão discutidos alguns dos resultados obtidos até o momento sobre o DIG extraplanar presente na galáxia ESO157-49. A detecção de fluxo da linha de emissão por recombinação $\text{H}\alpha$ é um dos possíveis indicativos de que há fotoionização daquele gás [5]. Assim, a Figura 6 mostra o mapa de densidade superficial da luminosidade em $\text{H}\alpha$, e nele vemos que a região do disco consiste na região de maior densidade de luminosidade, mas sem ter a emissão em $\text{H}\alpha$ restrita a esta região. Ou seja, regiões extraplanares apresentam densidade de luminosidade menor, indicando a ionização de um gás mais difuso distante do plano.

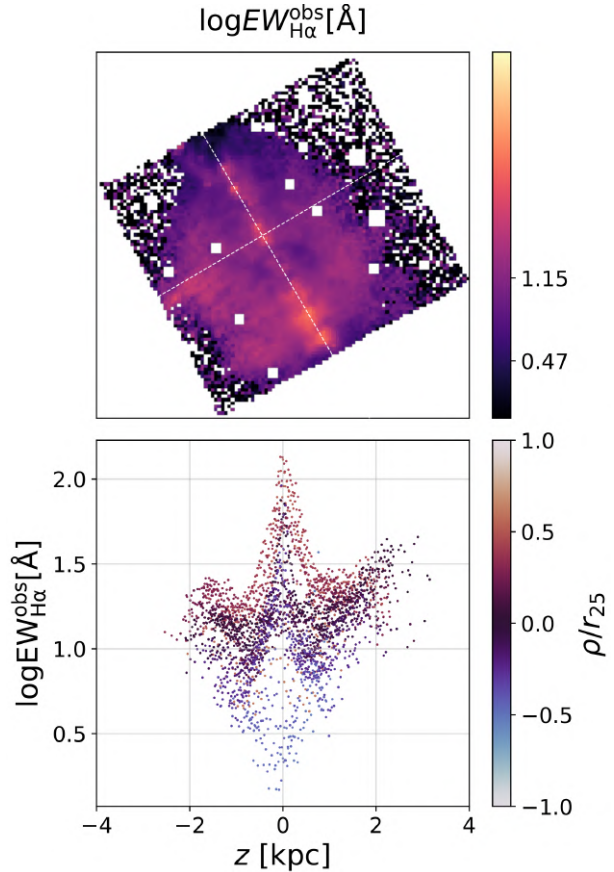


Figura 7: De cima para baixo, temos o mapa do logaritmo da largura equivalente de $\text{H}\alpha$ ($\text{EWH}\alpha$) e o gráfico do $\log \text{EWH}\alpha$ contra a distância ao plano z , respectivamente. Os pontos do painel inferior estão coloridos pela razão entre o raio da galáxia e o seu respectivo raio isofotal (ρ/r_{25}).

A linha $\text{H}\alpha$ também nos permite diagnosticar qual a principal fonte ionizante de uma região através da sua medida de largura equivalente ($\text{EWH}\alpha$). No entanto, é necessária cautela em utilizar este critério, pois este é válido apenas em caso de a fonte ionizante e a nebulosa ionizada estarem contidas na mesma região espacial observada. Segundo Lacerda et al. [19], regiões com $\text{EWH}\alpha < 3 \text{ \AA}$ têm as HOLMES como principal responsável pela sua ionização, enquanto que para valores maiores do que 14 \AA é identificada como principal fonte ionizante as estrelas OB. Na figura 7 temos o mapa e o gráfico do logaritmo de $\text{EWH}\alpha$ com relação à distância ao plano z , respectivamente, cujos pontos estão coloridos com relação à distância ao centro do plano ρ ponderada pelo raio isofotal r_{25} . Com base em ambos os painéis, podemos ver que a $\text{EWH}\alpha$ é maior que 3 \AA mesmo fora do plano, indicando, portanto, que a ionização da região extraplanar não é apenas ocasionada por HOLMES.

Para identificar variações na temperatura eletrô-

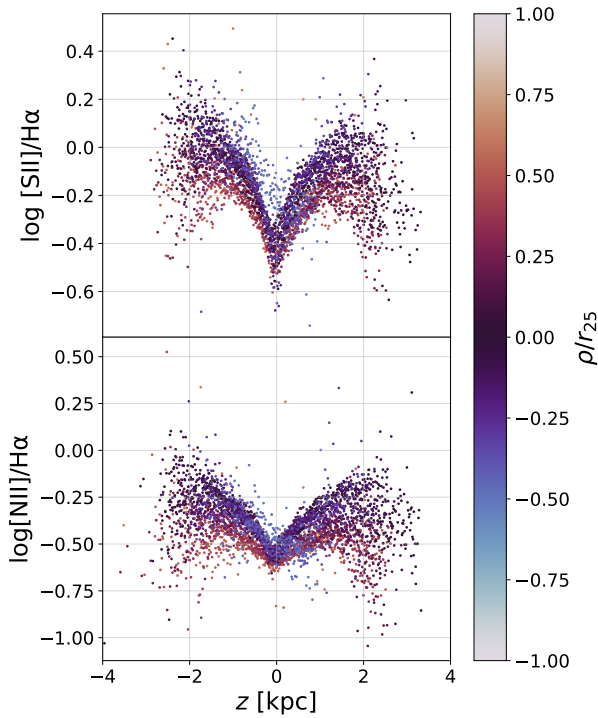


Figura 8: Gráficos do logaritmo do fluxo das razões de linhas de [S II]/H α (acima) e [N II]/H α (abaixo) contra a distância ao plano z . Os pontos em ambos os gráficos estão coloridos de acordo com a distância ao centro da galáxia ρ/r_{25} .

nica do gás podemos utilizar a razão dos fluxos entre linhas de excitação colisional e de recombinação, tais como [N II]/H α e [S II]/H α presentes na Figura 8. O aumento observado dessas razões com relação a z pode indicar um parâmetro de ionização mais baixo, ou, se associado juntamente a valores elevados de [O III]/H β , a necessidade de uma fonte ionizante mais energética que o escape de fótons provenientes das regiões H II para o DIG extraplanar. Dentre as possíveis fontes mais duras estão as HOLMES, propostas neste trabalho como possíveis fontes ionizantes da região difusa do gás.

Por fim, para que possamos quantificar a contribuição das HOLMES e estrelas OB como as principais fontes ionizantes do DIG extraplanar vamos comparar modelos de fotoionização com os dados observacionais, etapa esta que ainda se encontra em andamento. Na Figura 9 temos as razões de linhas [N II]/H α e [O III]/H β nos eixos x e y , respectivamente, com os pontos representando os valores observados e as linhas pretas, os modelos de fotoioni-

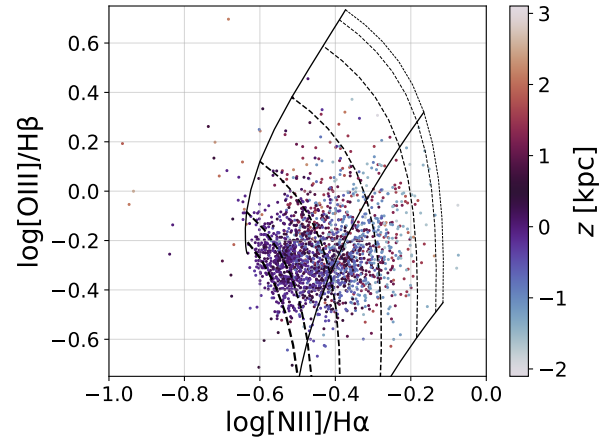


Figura 9: Diagrama de razões de linhas de [O III]/H β contra [N II]/H α . Os pontos são as medidas observacionais para a galáxia ESO157-49, cuja cor está relacionada com a distância ao plano z . As curvas pretas sólidas e tracejadas representam os modelos de fotoionização com o parâmetro de ionização $\log U$ e o fluxo de fótons superficial médio de fótons ionizantes emitidos por estrelas OB $\log \Phi_{OB}$ constantes, respectivamente. O aumento da espessura das linhas tracejadas representa o aumento de Φ_{OB} , indicando que as regiões com maior contribuição das estrelas OB coincide com a região próxima ao plano.

zação selecionados para $\log O/H = -3.3$. As linhas tracejadas e sólidas representam os modelos com valores constantes do fluxo superficial médio de fótons ionizantes emitidos por estrelas OB ($\log \Phi_{OB}$) e do parâmetro de ionização ($\log U$), respectivamente, e os pontos estão coloridos pela distância ao plano z . A espessura das linhas tracejadas aumenta para modelos com maiores valores de Φ_{OB} . Assim, vemos que os modelos cobrem quase toda a região de pontos observados, e também que os pontos mais distantes do plano apresentam menores valores de Φ_{OB} , indicando assim uma maior contribuição das HOLMES (Φ_{HOLMES}) nessa região. Quantificando, será possível verificar a parcela de contribuição das HOLMES com relação às estrelas OB (Φ_{HOLMES}/Φ_{OB}) para cada pixel, e conseqüentemente, se também existem tendências desse parâmetro com a altura extraplanar z .

4 Conclusão

Neste estudo pudemos identificar a presença do DIG na região extraplanar de galáxias espirais vistas de lado através da análise do objeto ESO157-49 observada com o VLT/MUSE. Com os valores da largura equivalente de H α para regiões fora do

plano, uma outra fonte de ionização além de HOLMES, como escape de fótons provenientes de regiões H II, tem papel relevante na ionização do DIG. No entanto, medidas de $[N II]/H\alpha$ e $[S II]/H\alpha$ para este objeto se mostram elevadas nas regiões mais distantes do plano, o que, se combinadas com valores elevados de $[O III]/H\beta$, podem indicar a existência de uma fonte de ionização mais dura, tais como as HOLMES. Os modelos com maior Φ_{OB} estão localizados na região de pontos de pequeno $|z|$, indicando possivelmente uma contribuição mais significativa das HOLMES para regiões mais distantes do plano. Para, enfim, quantificar a contribuição de cada uma dessas duas fontes, iremos comparar as medidas das razões de linha de cada ponto com os modelos de fotoionização.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). JSM agradece à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pela infraestrutura oferecida e também à organização do evento *As Astrocientistas - II Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Gravitação e Cosmologia* pela oportunidade de apresentar o meu trabalho. NVA agradece o apoio da Royal Society e do Newton Fund através da Royal Society–Newton Advanced Fellowship (NAFR1\180403).

Sobre as autoras

Janayna de Souza Mendes é bacharela e mestra em física pela Universidade Federal de Santa Catarina, onde atualmente realiza seu doutorado (jana-mendesfsc@gmail.com). Ao longo de sua trajetória trabalhou com análise de cubos de dados em diferentes projetos. Ao fim de sua graduação iniciou o seu estudo sobre o gás difuso ionizado, o que levou ao tema de sua dissertação de mestrado. Ainda em andamento, trabalha neste projeto durante o início de seu doutorado.

Natalia Vale Asari é professora no Departamento de Física da UFSC desde 2014 e subcoordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física da UFSC desde 2021. Recebeu o Prêmio Carolina Nemes da

Sociedade Brasileira de Física em 2019. Sua pesquisa, em colaboração com colegas na França, México, Polônia e Escócia, é voltada para populações estelares e abundâncias químicas de galáxias.

Referências

- [1] E. P. Hubble, *Extragalactic nebulae.*, *The Astrophysical Journal* **64**, 321 (1926).
- [2] G. de Vaucouleurs et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (1991).
- [3] *Spiral Galaxy (Side View, Purple)*, <https://universe.nasa.gov/resources/198/spiral-galaxy-side-view-purple/>, accessed: 2023-11-19.
- [4] *Spiral Galaxy (Purple)*, <https://universe.nasa.gov/resources/200/spiral-galaxy-purple/>, accessed: 2023-11-19.
- [5] L. M. Haffner et al., *The warm ionized medium in spiral galaxies*, *Reviews of Modern Physics* **81**(3), 969 (2009). [ArXiv:0901.0941](https://arxiv.org/abs/0901.0941).
- [6] A. Zurita, M. Rozas e J. E. Beckman, *The origin of the ionization of the diffuse interstellar medium in spiral galaxies. I. Photometric measurements*, *Astronomy & Astrophysics* **363**, 9 (2000).
- [7] F. Hoyle e G. R. A. Ellis, *On the Existence of an Ionized Layer about the Galactic Plane*, *Australian Journal of Physics* **16**, 1 (1963).
- [8] *Nublado, paisagem no céu*, https://br.freepik.com/fotos-gratis/nublado-no-papel-de-parede-da-paisagem-do-ceu_19380998.htm, accessed: 2023-11-19.
- [9] *NGC1566 Hubble Tangos with a Dancer in Dorado*, <https://science.nasa.gov/missions/hubble/hubble-tangos-with-a-dancer-in-dorado/>, accessed: 2023-11-19.
- [10] N. Flores-Fajardo et al., *Ionization of the diffuse gas in galaxies: hot low-mass evolved stars at work*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **415**(3), 2182 (2011). [ArXiv:1104.0525](https://arxiv.org/abs/1104.0525).

- [11] G. Stasińska, M. Trevisan e N. Vale Asari, *Planetary Nebulae and the Ionization of the Interstellar Medium in Galaxies*, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* **9**, 913485 (2022).
- [12] R. Bacon et al., *The MUSE second-generation VLT instrument*, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III*, editado por I. S. McLean, S. K. Ramsay e H. Takami (2010), vol. 7735 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, 773508. [ArXiv:2211.16795](https://arxiv.org/abs/2211.16795).
- [13] S. Comerón et al., *The kinematics of local thick discs do not support an accretion origin*, *Astronomy & Astrophysics* **623**, A89 (2019). [ArXiv:1901.10294](https://arxiv.org/abs/1901.10294).
- [14] *MUSE data-cube schematic representation*, <https://www.eso.org/public/blog/the-many-faces-of-galaxies/>, accessed: 2023-11-19.
- [15] R. Cid Fernandes et al., *Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **358**(2), 363 (2005). [ArXiv:astro-ph/0412481](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0412481).
- [16] T. Z. Flórido, *Análise de linhas de emissão em galáxias: O gás difuso ionizado nas galáxias do MaNGA*, Dissertação de Mestrado, UFSC (2018).
- [17] G. J. Ferland et al., *CLOUDY 90: Numerical Simulation of Plasmas and Their Spectra*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **110**(749), 761 (1998).
- [18] C. Morisset, *The Mexican Million Models database: a virtual observatory for gaseous nebulae*, *Mem. Societa Astronomica Italiana* **80**, 397 (2009). [ArXiv:0909.3313](https://arxiv.org/abs/0909.3313).
- [19] E. A. D. Lacerda et al., *Diffuse ionized gas in galaxies across the Hubble sequence at the CALIFA resolution*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **474**(3), 3727 (2018). [ArXiv:1711.07844](https://arxiv.org/abs/1711.07844).

Estudo de deflexões de UHECR na presença do campo magnético galáctico JF2012

Larissa Cristina Santos¹ e Rita de Cássia dos Anjos^{1,2}

¹Universidade Federal da Integração Latino-Americana

²Universidade Federal do Paraná

Resumo

A produção e aceleração de raios cósmicos de altas energias (Ultra-high energy cosmic rays - UHECR) no Universo continua sendo um dos grandes mistérios da ciência moderna. Os mecanismos de aceleração de partículas altamente energéticas em fontes astrofísicas são ainda desconhecidos. O principal objetivo deste estudo foi explorar a distribuição de emissão e chegada de UHECR originadas de radiogaláxias. Utilizou-se como possíveis fontes as radiogaláxias Centaurus A, Fornax A e M87 devido a sua correlação com a direção de chegada de eventos medidos do Observatório Pierre Auger. Explorou-se as potencialidades de detecção dessas partículas considerando o efeito do modelo do campo magnético Galáctico Jansson-Farrar 2012 (JF2012). O estudo da influência do campo magnético auxilia na compreensão da geração e propagação dos UHECR. Para o estudo, foi utilizado o programa computacional Cosmic Ray Transport (CRT), o programa não considera perdas de energia, mas foi utilizado para a quantificação dos desvios das partículas a partir dos seguintes parâmetros: rigidez da energia, distância da fonte à Terra, direção da fonte no céu e carga/massa da partícula a ser propagada. Os resultados obtidos quantificam o efeito do campo magnético Galáctico nas diferentes direções das radiogaláxias e indicam que o campo Galáctico deve ser considerado a partir de energias próximas a 16 EeV.

Abstract

The production and acceleration of high-energy cosmic rays (Ultra-high energy cosmic rays - UHECR) in the Universe remains one of the great mysteries of modern science. The mechanisms of acceleration of highly energetic particles in astrophysical sources are still unknown. The main objective of this study was to explore the distribution of UHECR emission and arrival originating from radio galaxies. The radio galaxies Centaurus A, Fornax A and M87 were used as possible sources due to their correlation with the direction of arrival of events measured at the Pierre Auger Observatory. The detection potential of these particles was explored considering the effect of the Jansson-Farrar 2012 (JF2012) Galactic magnetic field model. The study of the influence of the magnetic field helps to understand the generation and propagation of UHECR. For the study, the computational program Cosmic Ray Transport (CRT) was used. The program does not consider energy losses, but was used to quantify particle deviations based on the following parameters: energy rigidity, distance from the source to the Earth, direction of the source in the sky and charge/mass of the particle to be propagated. The results obtained quantify the effect of the Galactic magnetic field in the different directions of radio galaxies and indicate that the Galactic field must be considered from energies close to 16 EeV.

Palavras-chave: astrofísica extragaláctica, raios cósmicos, campos magnéticos

Keywords: extragalactic astrophysics, cosmic rays, magnetic fields

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44960](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44960)

1 Introdução

O estudo de raios cósmicos iniciou-se aproximadamente em 1900 e seu marco deu-se em 1912, com o físico Austríaco Victor Hess. Hess realizou experimentos medindo a radiação ionizante em grande altitude com um aparelho conhecido como eletroscópio. Essa foi a primeira evidência que a ionização atmosférica era de origem extraterrestre [1]. Com os avanços dos estudos foi possível detectar os primei-

ros Raios Cósmicos de Energia Ultra-Alta (UHECR), em um experimento chamado *Volcano Ranch*, criado por John Linsley, em 1962 [2]. Desde então, vários observatórios foram criados para a detecção de partículas energéticas.

Com o espectro de energia de raios cósmicos [3], é possível obter várias informações importantes sobre essas partículas altamente energéticas que são aceleradas e percorrem todo o universo praticamente na

velocidade da luz. As ordens de grandeza dessas partículas no espectro de energia variam de GeV a EeV: os raios cósmicos de mais baixa energia, na faixa de GeV, em sua maioria, são provenientes de fontes Galácticas, como supernovas, já os UHECR ainda não possuem fontes totalmente definidas, mas, através de estudos já realizados [3, 4] é possível analisar as prováveis fontes dessas partículas.

2 Raios cósmicos de energia ultra-alta (UHECR)

Embora sua origem exata ainda seja desconhecida, os raios cósmicos são partículas aceleradas que se propagam por todo universo, a sua composição vai desde prótons até núcleos mais pesados. Acredita-se que essas partículas são provenientes de galáxias próximas [4, 5]. O espectro de energia de raios cósmicos permite analisar o fluxo de partículas por energia e é representado através de uma lei de potência [6], conforme a expressão:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha}, \quad (1)$$

onde α representa o índice espectral. As partículas de altas energias, ou seja, na faixa de 10^{18} eV (EeV) estão localizadas na região conhecida como “tornozelo” [6]. Para o estudo dos UHECR utilizam-se os dados do Observatório Pierre Auger, localizado em uma região conhecida como Pampa Amarilla, na Argentina. Este Observatório é o maior na detecção de partículas altamente energéticas, a sua área de detecção fica concentrada em Mendoza, na Argentina. No processo de detecção, o observatório utiliza principalmente dois métodos independentes: detectores de superfície e de fluorescência [7].

O universo em sua imensidão é também constituído por partículas bariônicas, pertencentes à família dos bárions, com por exemplo os prótons e os nêutrons. A composição dos raios cósmicos varia, indo de núcleos considerados mais “leves”, até núcleos mais “pesados”, como exemplo, Ni, Si e Fe. Essas partículas interagem com outros núcleos durante sua propagação, o que gera decaimentos e geração de partículas secundárias [8]. Com a chegada dessas partículas na atmosfera terrestre ocorre a formação dos chuviscos atmosféricos, que são detectados pelos observatórios. O fluxo por energia dessas partículas presentes nos chuviscos está associado às informações sobre a composição desses UHECR [7].

A anisotropia diz respeito ao comportamento dos raios cósmicos ultra energéticos em determinadas direções. Há uma dificuldade em se detectar partículas aqui na Terra devido a influência dos campos magnéticos Galáctico e extragaláctico. Sabe-se que a distribuição angular dessas partículas é isotrópica, ou seja, as propriedades físicas são independentes das direções neste meio, mas, isso é válido segundo dados científicos para partículas de mais baixa energia, abaixo de 10^{14} eV [9].

3 Fontes de UHECR

Em dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger constatou-se que existe uma correlação na direção de chegada de eventos na região ao redor das radiogaláxia Centaurus A, Fornax A e M87. Os resultados das observações e as regiões onde se encontram estas galáxias as tornam possíveis fontes de grande interesse, por esse motivo decidiu-se explorá-las neste estudo [5, 10]. As informações do observatório para um número de eventos observados com $E \leq 55$ EeV conforme mostrado na pesquisa [11], é a motivação para o aprofundamento dessas análises, através das simulações nestas regiões em diferentes faixas de energia.

Centaurus A é a Galáxia mais próxima, estando a uma distância de 3.84 Mpc, também conhecida como NGC 5128, é uma radiogaláxia que foi descoberta por James Dunlop, em 1826, estando localizada na constelação de Centauro, tendo seu formato elíptico, sendo bastante massiva [12].

A Fornax A também conhecida como NGC 1316, está localizada a aproximadamente 20.9 Mpc, apresentando um formato elíptico. Possui uma luminosidade de aproximadamente $8,3 \times 10^{40}$ erg/s [13].

A M87 também conhecida como NGC 4486 é uma radiogaláxia elíptica presente no aglomerado de Virgem, está a aproximadamente 18.4 Mpc. Possui uma luminosidade estimada em $7,6 \times 10^{40}$ ergs/s. A Messier 87 tem em seu centro um buraco negro supermassivo responsável pelo jato de partículas ultra alta energéticas que emergem dessa região [14].

4 Modelo de campo magnético galáctico JF2012

O modelo Campo Magnético Galáctico - JF2012 é o mais completo comparado com os anteriores, trata-se de um modelo reajustado, que possui duas componentes a mais, uma componente perpendicular ao

plano e outra componente de um campo aleatório “estriado”. O modelo JF2012 utiliza o mapa de emissão síncrotron WMAP7 e várias medidas de rotação extragaláctica para reajustar os parâmetros do modelo [15].

A radiação síncrotron e a rotação de Faraday são os mecanismos mais utilizados para restringir os parâmetros no campo magnético Galáctico de grande escala. Esse modelo contempla três tipos de campos magnéticos Galácticos, descritos nos tópicos seguintes, o primeiro é o campo regular de grande escala, o segundo descreve o campo aleatório estriado e o terceiro explica o campo randômico [16].

4.1 Campo regular

O campo regular de grande escala é estruturado por três componentes, sendo eles: um disco, um halo toroidal e uma componente fora do plano, esses componentes são definidos separadamente, o que faz com que não haja divergência. Este campo colabora com dados de emissão síncrotron total I, emissão síncrotron polarizadas PI e medida de rotação de Faraday [17].

4.1.1 Disco

O campo do disco é determinado a partir de uma variação de raios de 3 kpc a 20 kpc, no plano (x,y), sendo que para raios de 3 kpc à 5 kpc o campo é azimutal [18]. Acima de 5 kpc até 20 kpc o campo possui oito regiões espirais e suas respectivas linhas são representadas pela seguinte expressão:

$$r = r_{-x} e^{(\phi \operatorname{tg}(90-i))}, \quad (2)$$

onde i é igual a $11,5^\circ$ que representa o ângulo de inclinação, o r_{-x} é o valor do raio onde uma espiral cruza o eixo x negativo ($r_{-x} = 5,1, 6,3, 7,1, 8,3, 9,8, 11,4, 12,7, 15,5 \text{ kpc}$) para os oito braços. A intensidade do campo pode ser definida como:

$$\vec{b} = \operatorname{sen}(i)\vec{r} + \operatorname{cos}(i)\vec{\phi}, \quad (3)$$

essa intensidade para cada braço é definida em um raio de 5 kpc e cai com $1/r$. Para encontrarmos a força do campo no oitavo braço, é utilizada a seguinte expressão:

$$b_8 = - \sum_{i=1}^7 f_i b_i / f_8, \quad (4)$$

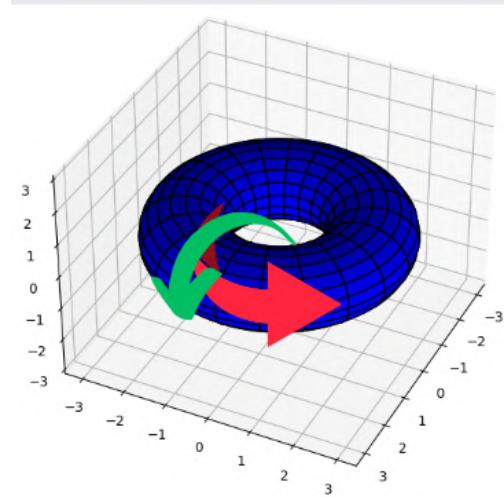


Figura 1: Geometrias da componente de halo: poloidal representada pela seta verde e toroidal representada pela seta vermelha.

onde f_i é a área da seção transversal relativa das espirais em um raio fixo. O componente do disco é multiplicado por

$$(1 - L(z, h_{disco}, \omega_{disco})),$$

onde:

$$L(z, h, \omega) = (1 + e^{-2(|z|-h)/\omega})^{-1}, \quad (5)$$

onde h define a altura e ω a largura da região de transição.

4.1.2 Halo toroidal

Esse componente do campo é toroidal ou puramente azimutal [18], ver Figura 1. Ainda, esse campo pode ser definido como:

$$B_{\phi}^{tor}(r, z) = e^{-(|z|/z_0)} L(z, h_{disco}, \omega_{disco}) \times \begin{cases} B_n(1 - L(r, r_n, \omega_n)) \\ B_s(1 - L(r, r_s, \omega_s)) \end{cases} \quad (6)$$

4.1.3 Componente fora do plano

Foi adicionado à componente halo na geometria poloidal uma componente fora do plano, esta componente também é axissimétrica, ou seja, possui simetria apenas no eixo x.

4.2 Campo regular + estriado

Como já mencionado anteriormente, o modelo Jansson-Farrar adicionou uma componente a mais no

campo aleatório junto ao campo regular, conhecido como “estriado”, seguindo dados teóricos. Acredita-se que os campos estriados são gerados quando as bolhas de plasma quente sofrem levitações, realizando, assim, o transporte dos campos aleatórios que ficam presos e estão distantes do disco. Outra possível produção de campos estriados é a rotação diferencial que ocorre em campos aleatórios de pequena escala. Esses dois processos podem ocorrer simultaneamente [19]. A força do campo estriado é definida como:

$$B_{estri}^2 = \beta B_{reg}^2, \quad (7)$$

podendo, assim, dizer que a força do campo estriado é proporcional ao campo regular por um fator β [19].

Observa-se um campo em formato de X semelhante a alguns já observados nas bordas das galáxias. O campo em cada posição (r, z) é especificado em termos de r_p , o raio no qual a linha de campo passando por (r, z) cruza o plano $z = 0$. O campo fora de um raio galactocêntrico de 5 kpc tem um ângulo de elevação constante (Θ_x^0) em relação ao plano médio. Para o raio menor, o ângulo de elevação é linear com o raio, tornando-se vertical no centro. A intensidade do campo no plano médio é definida por:

$$b_x(r_p) = B_x e^{-r_p/r_x}, \quad (8)$$

onde B_x é a amplitude do campo em $(r = 0, z = 0)$. Na região com ângulo de elevação constante, a intensidade do campo é:

$$b_x(r_p)r_p/r, \text{ com } r_p = r - |z|/\tan(\Theta_x^0). \quad (9)$$

Na região com ângulo de elevação variável, a intensidade do campo é:

$$b_x(r_p)(r_p/r)^2, \quad (10)$$

para

$$r_p = r r_x^c / (r_x^c + |z|/\tan(\Theta_x^0)) \quad (11)$$

e

$$\Theta_x(r, z) = \tan^{-1}(|z|/(r - r_p)). \quad (12)$$

Ao todo, a componente fora do plano tem quatro parâmetros livres: B_x , (Θ_x^0) , r_x^c e r_x .

Onde B_x é a intensidade do campo na origem, (Θ_x^0) é o ângulo de elevação em $z = 0$ e $r > r_x^c$, r_x^c é o raio onde $\theta_x = (\Theta_x^0)$ e r_x é o comprimento da escala exponencial.

4.3 Campo randômico

Para melhorar as observações, o modelo realizou um ajuste no WMAP I através da superposição do campo aleatório em uma componente de disco, tendo uma região central e oito braços espirais com a mesma geometria, mais uma componente de halo estendido. Os três modelos de campo contribuem de maneira diferente. O campo aleatório contribui apenas para emissão síncrotron total, representado pela letra I. Outro aspecto que diferencia o campo aleatório (*random*) dos demais é a força do campo, definida como:

$$B_{rand} = \sqrt{B_{disco}^2 + B_{halo}^2}. \quad (13)$$

A componente de disco do campo aleatório Galáctico (GRF) é estruturado como um produto entre o fator radial e um perfil vertical, considerando uma largura gaussiana z_0^{disco} . O fator radial (b_{int}) é constante até 5 kpc, acima disso, a força rms muda de um braço espiral para outro. A 5 kpc a força do i -ésimo braço espiral é definido como b_i e cai com $\sim 1/r$ em raios maiores. Já o campo aleatório de halo é representado pela expressão [18]:

$$B_{halo} = B_0 e^{[-r/r_0]} e^{[-z^2/2z_0^2]}, \quad (14)$$

onde, há o produto entre uma exponencial em relação ao raio e uma exponencial gaussiana da direção vertical.

Assim, é preciso compreender como o programa computacional Cosmic Ray Transport - CRT implementa o modelo de campo JF2012 [20]. Primeiramente, o programa gera imagens de campos magnéticos aleatórios. O código que é utilizado no CRT considera o volume da galáxia como sendo um cubo de 40 kpc, localizado no centro Galáctico (GC) e subdividido em 64 mil blocos, cada um com 1 kpc de um lado.

Pequenas esferas magnéticas são distribuídas aleatoriamente dentro e fora dos blocos. A quantidade de partículas desejada é definida pelo usuário. Esse processo de divisão permite rastrear essas partículas dentro da Galáxia. Suas posições são determinadas aleatoriamente em um volume de 20 kpc do GC. Para calcular o vetor de campo magnético aleatório o CRT relaciona uma lista de vetores de partículas individuais. No processo da geração do campo magnético aleatório, para cada bloco, o programa inclui uma lista de partículas exclusivas contidas nesses blocos. As posições das partículas para um bloco específico é de

1 kpc. Durante o processo de rastreamento, o CRT filtra apenas as células que contribuem com o vetor de campo total, otimizando desta forma o tempo [20].

5 UHECR de radiogaláxias

A grande dificuldade da astrofísica moderna em encontrar as fontes de raios cósmicos de ultra-alta energia, está na propagação dessas partículas na presença de campos magnéticos, ou seja, nesse processo os UHECR sofrem deflexões, impedindo a obtenção das posições exatas da origem dessas partículas.

Para uma partícula ultra-relativística como um próton da ordem de $E \sim 10^{19}$ eV, a massa se torna desprezível e sua velocidade passa a ser igual a velocidade da luz. Portanto, pode-se descrever a velocidade de uma partícula com carga relativística em um campo magnético uniforme e constante a partir da força de Lorentz:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{c^2 q}{E} (\mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (15)$$

onde, q é a carga da partícula, v sua velocidade e E sua energia e B é o campo magnético do meio. O que define o quanto um UHECR é defletido na presença do campo magnético Galáctico é a relação de energia por carga, conhecida como rigidez $R = E/Zc$.

Nas análises iniciais das deflexões, simulou-se 500 mil partículas com um índice espectral de 1.7, energia mínima de 10 EeV e energia máxima de 100 EeV, bem como as coordenadas de longitude e latitude de acordo com as fontes, e empregando o componente do campo regular. A escolha de um índice espectral baixo tem o objetivo de produzir um espectro com decaimento em energias altas energias, dado que o programa não leva em consideração perdas de energia [4].

Essa análise foi conduzida para as três fontes com o propósito de determinar a distribuição das deflexões pelas energias para avaliar a influência do campo magnético Galáctico. Devido à falta de parâmetros extragalácticos no CRT, projetou-se as fontes na borda da galáxia em um disco de 8 kpc no campo de visão da fonte.

A figura 2(a) exibe a análise das deflexões das partículas provenientes da radiogaláxia Centaurus A, detectadas por um detector situado a 0.4 kpc, na presença do campo magnético regular. A deflexão máxima observada para Centaurus A aproximou-se dos

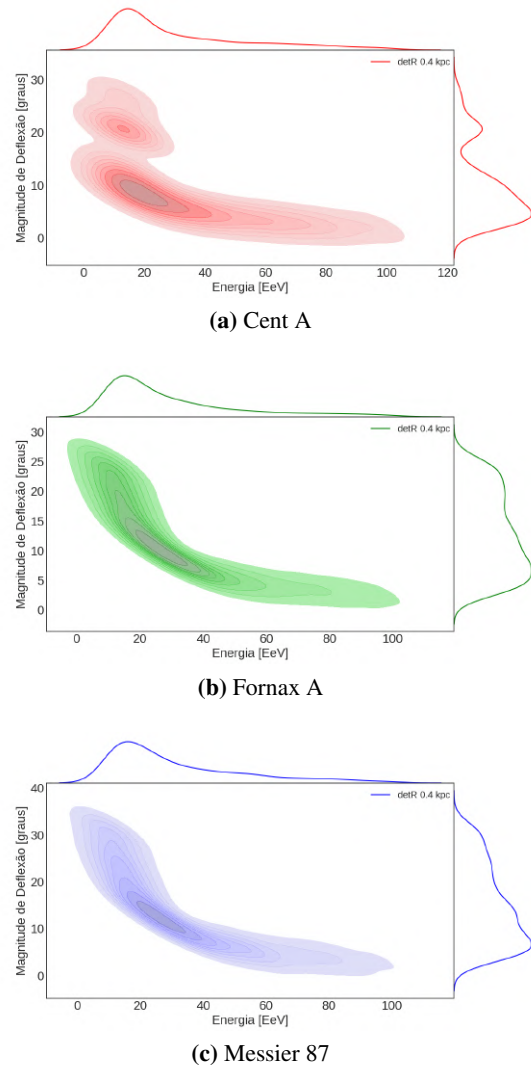


Figura 2: Deflexões de UHECR provenientes das regiões das radiogaláxias na presença do campo regular (JF2012-reg) para (a) Centaurus A, (b) Fornax A e (c) Messier 87. O eixo x apresenta a distribuição de energia em unidades de (EeV) e o eixo y o ângulo de deflexão em (graus). As distribuições acima e ao lado direito do plot representam a região onde se concentra o maior número de partículas.

30 graus. Realizou-se uma análise idêntica, com os mesmos parâmetros, para a fonte Fornax A, como representado na figura 2(b). Nesse caso, Fornax A apresentou uma deflexão inferior a 30 graus. Por outro lado, a figura 2(c) apresenta os resultados obtidos na análise da fonte Messier 87. Em comparação com as outras duas fontes, Messier 87 foi a que mais sofreu deflexão, ou seja, foi mais afetada pelo campo magnético Galáctico JF12-reg, com um ângulo superior a 30 graus. O pico de deflexão ocorreu próximo a 20 graus para as três fontes, conforme ilustrado nas linhas acima do gráfico.

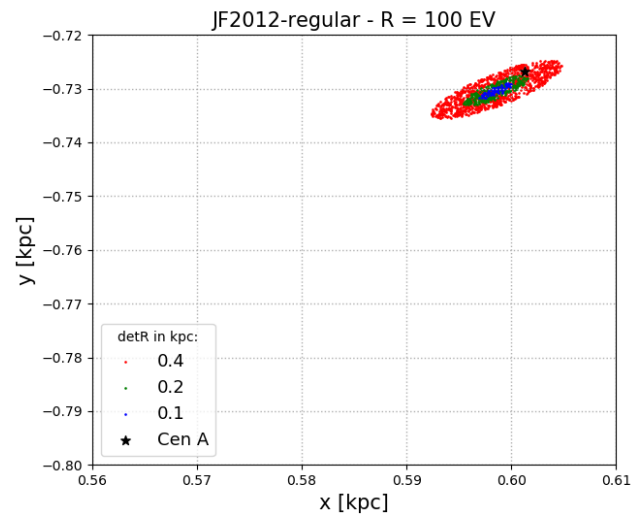
5.1 Posições iniciais dos UHECR na região das fontes

As distribuições das posições iniciais das partículas ao saírem da região da fontes foram estudadas. Para essa análise variou-se o tamanho dos detectores entre 0.1 kpc e 0.4 kpc e se utilizou rigidez de 16 EV e 100 EV, para as três fontes. Essa análise teve o intuito de verificar a região com maior concentração de partículas próximas à fonte [11].

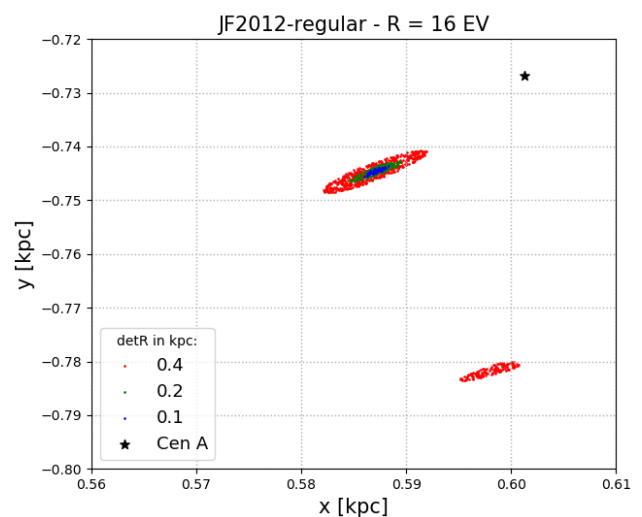
Selecionou-se o valor de 8 kpc para o raio inicial do disco de injeção, no qual diversas partículas foram inseridas, seguindo uma lei de potência com índice espectral de 1.7. Os vetores de velocidade iniciais das partículas foram alinhados com a direção da fonte, conforme observado da Terra. Essas partículas então foram propagadas pelo GMF, componente regular em um *Forward-Tracking*, esse processo ocorre quando uma partícula é injetada de uma fonte extragaláctica e se propaga através do GMF até finalmente atingir o detector centrado na Terra. Nesta análise, essas partículas foram monitoradas para determinar se alcançam o detector. Destaca-se que o tamanho do detector desempenhou um papel significativo no número de detecções bem-sucedidas. As figuras 3(a) e 3(b) mostram as posições iniciais das partículas próximas à Centaurus A, com rigidez de 100 EV figura 3(a) e 16 EV figura 3(b), com detectores variando de 0.1 kpc a 0.4 kpc.

Nesta análise, Centaurus A está no eixo z, o qual é a origem e encontra-se ao longo da direção da linha de visada. Observou-se que as partículas com rigidez maior, figura 3(a), encontram-se próximas ao centro da fonte, dessa forma, não foi possível determinar uma região com maior número de concentração de partículas. Com rigidez menor, essas partículas sofrem mais a influência do campo magnético Galático. Observou-se que para uma rigidez de 16 EV, figura 3(b), identifica-se uma distribuição dessas partículas em regiões distintas. Esse efeito ocorre somente para detectores de 0.4 kpc. Dessa forma, pode-se compreender em qual região estão concentrados esses raios cósmicos de diferentes energias e compreender como o GMF interfere na propagação dessas partículas dentro da Galáxia.

Como se optou por investigar as três radiogaláxias, realizou-se as mesmas análises para as três possíveis fontes. A figura 4 mostra as posições iniciais dos UHECR provenientes da Fornax A, com uma rigidez de 100 EV figura 4(a) e uma rigidez de 16 EV figura



(a) Cen A - 100 EV



(b) Cen A - 16 EV

Figura 3: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV e 16 EV, para diferentes tamanhos de detectores. A estrela preta representa a posição do centro de Cen A.

4(b). A radiogaláxia Fornax A foi a que registrou a menor deflexão angular das partículas detectadas, conforme previamente exposto na figura 4(b). Novamente, nota-se que para uma rigidez de 100 EV, os raios cósmicos permanecem próximos ao centro da fonte. Esses resultados tendem a se assemelhar para as três potenciais fontes de UHECR devido às altas energias das partículas envolvidas.

Partículas com energias menores tendem a se afastarem mais da fonte, devido à influência do campo magnético Galático regular, como mostra a figura 4(b). Quanto menor a energia, maior a distância das

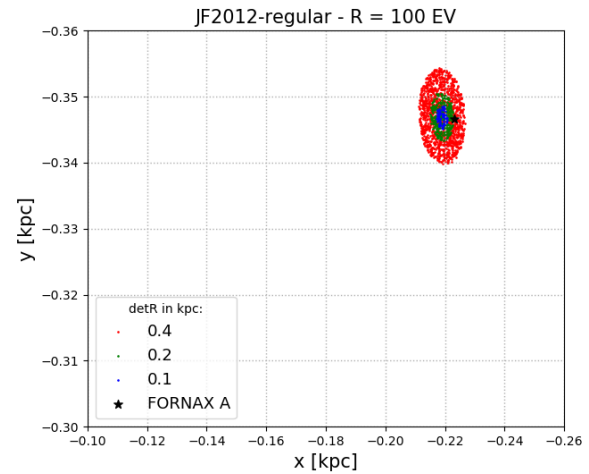
partículas cósmicas em relação ao centro de origem da fonte. Para Fornax A, as partículas detectadas se concentraram em uma única região, ao contrário do observado para a fonte Centaurus A com rigidez de 16 EV, onde se identificou uma distribuição mais dispersa.

A Messier 87 foi a fonte que mais sofreu a influência do campo magnético Galáctico regular nas análises deste estudo, conforme evidenciado na figura 5. A figura 5(cima) ilustra que, para uma rigidez de 100 EV, os eventos foram detectados muito próximos ao centro da fonte, um padrão que também se repete nas fontes Centaurus A e Fornax A. Por outro lado, ao considerar uma rigidez de 16 EV, observa-se que, em relação à Centaurus A e Fornax A, os eventos em M87 afastaram-se mais da fonte. A figura 5(baixo) destaca claramente que os raios cósmicos provenientes da direção de M87 são expostos a uma deflexão significativamente maior devido à presença do GMF-Regular.

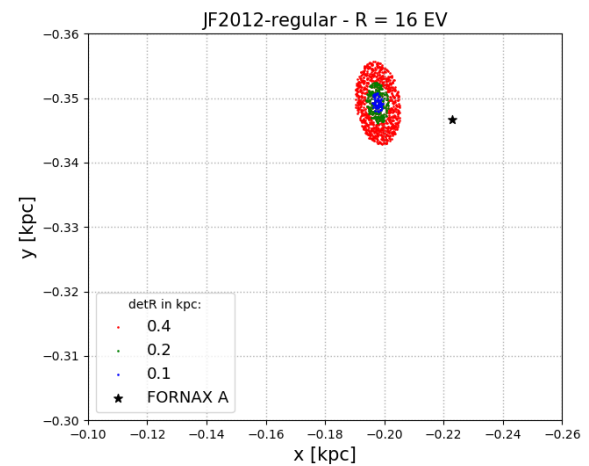
6 Deflexões em mapa celeste

As informações sobre a distribuição final dessas partículas detectadas em coordenadas cartesianas também podem ser obtidas em coordenadas galácticas em mapa celeste, permitindo uma visualização ampla do efeito do campo. Para reforçar os resultados sobre as posições finais dessas partículas, realizou-se verificações em coordenadas galácticas com as mesmas rigidezes anteriores, além de rigidezes ainda menores, como 10 EV e 4 EV. A figura 6 apresenta um mapa celeste com a representação das posições finais das partículas para energias mais altas, variando de 32 EV a 100 EV. Os resultados são análogos à análise anterior, com a possibilidade de observar as três fontes juntas. Na região de Centaurus A, pode-se observar partículas de energia mais baixa próximas à fonte em comparação com as outras duas fontes. Na região da Fornax A, as partículas de 4 EV estão localizadas bem distantes da fonte, enquanto na M87, as partículas de energia mais baixa, como 4 EV, não são detectadas, vide figura 7.

Este estudo teve como objetivo investigar o efeito do GMF na propagação de partículas ultra energéticas quando estas entram na Galáxia. Foram simuladas 1 milhão de partículas isotropicamente, incluindo núcleos como He, N, Si e Fe, sendo analisadas apenas as partículas que adentram à Galáxia na região



(a) Fornax A - 100 EV



(b) Fornax A - 16 EV

Figura 4: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados.

das radiogaláxias. Durante esse processo, também se considerou um espectro na fonte com índice espectral de 1.7 e energia máxima e mínima variando. A escolha do índice espectral de 1.7 foi devido ao fato do programa CRT não considerar a perda de energia, com isso há um decaimento maior do espectro, facilitando assim a análise dos dados. Essa análise fisicamente é definida por uma lei de potência conforme mostra a equação 16. Nesta análise adotou-se as três componentes do campo Jansson-Farrar [4].

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (16)$$

A figura 8 apresenta as posições de origem de UHECR que foram detectados ao redor das fontes de

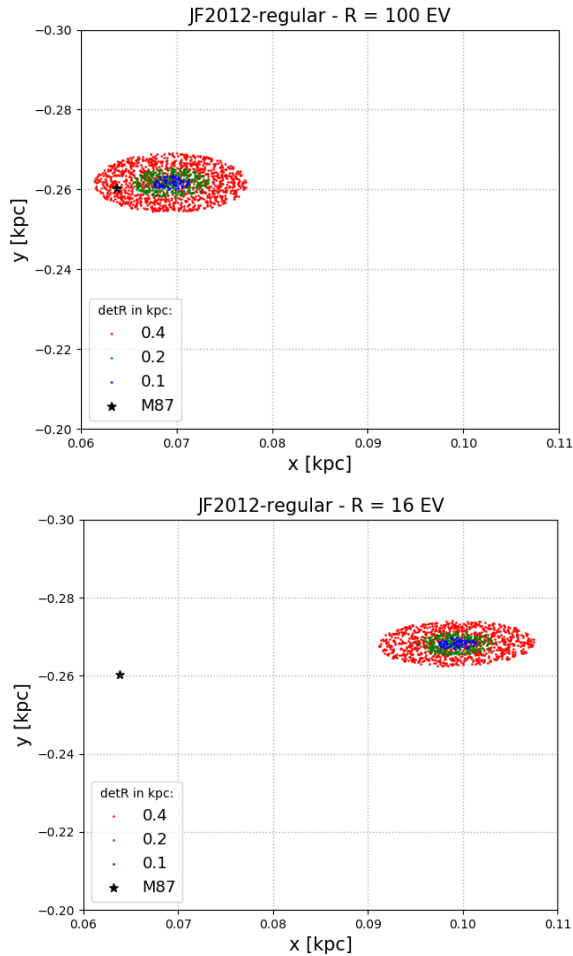


Figura 5: Projeção x-y das posições iniciais dos eventos simulados com rigidez de 100 EV e 16 EV para diferentes tamanhos de detectores. A estrela preta representa a posição do centro de M87.

Centaurus A, Fornax A e M87. Nesta figura a energia varia entre 40 EeV e 316 EeV. Limitou-se uma região de até 2 graus ao redor de cada fonte, as partículas mais leves, como de He e de N, encontram-se centradas em regiões bem próximas às fontes, já as partículas com núcleos mais pesados, como o Si e o Fe, estão mais distribuídas em regiões distantes.

Realizou-se a mesma análise anterior, considerando raios de 5° e 8° graus ao redor de cada fonte, figuras 9 e 10. Claramente o número de eventos detectados foram maiores, mostrando regiões de onde as partículas poderiam se originar. Observou-se que as partículas de núcleos mais pesados se encontram em posições bastante aleatórias, quando aumentado o raio para 8° percebeu-se que a dispersão é bem maior, figura 10. Para uma análise mais precisa das regiões próximas às fontes, o raio de 2° torna-se mais rele-

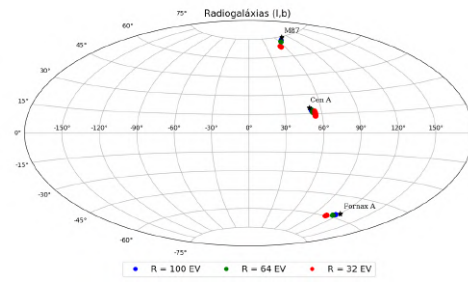


Figura 6: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

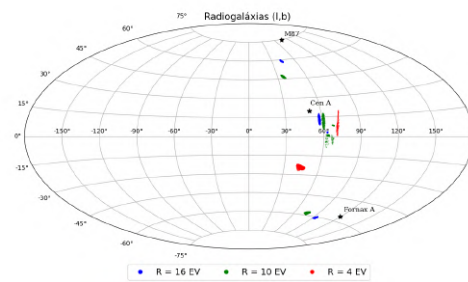


Figura 7: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

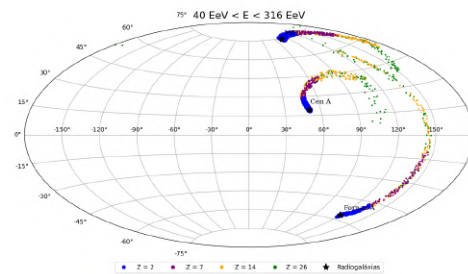


Figura 8: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

vante.

Sabe-se que as partículas de menor energias sofrem maiores deflexões, em razão disso avaliou-se a variação de energia na simulações. Nas próximas figuras a mesma análise foi realizada com energias a partir de 70 EeV e 100 EeV, respectivamente. A figura 11 ilustra essa análise com um raio inicial de 2° ao redor da fonte e energias variando entre 70 EeV < E < 316 EeV, e para um raio de 5° (figura 12)

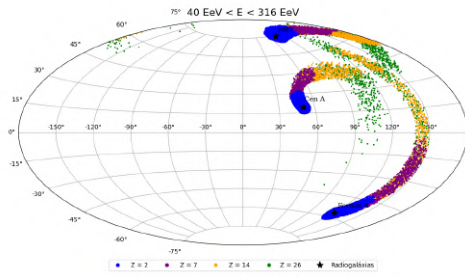


Figura 9: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

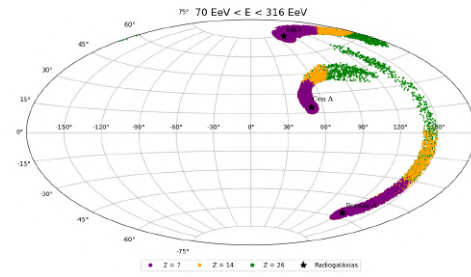


Figura 12: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte.

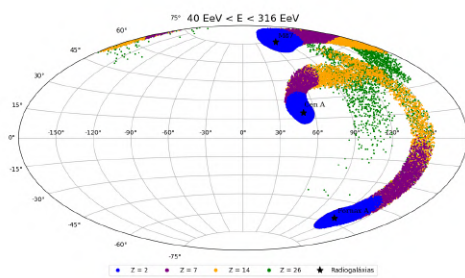


Figura 10: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV.

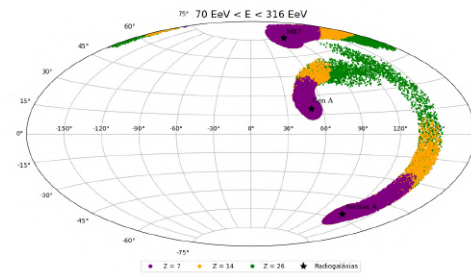


Figura 13: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte.

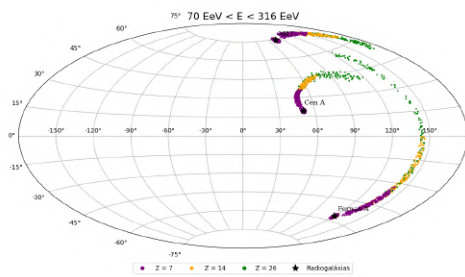


Figura 11: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte.

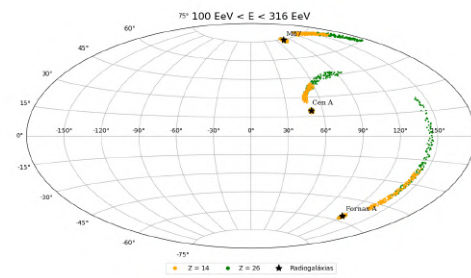


Figura 14: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 2 graus ao redor de cada fonte.

e 8° (figura 13). Núcleos mais leves como de He desintegram-se e não sobrevivem a energias altas, por conta disso, o elemento He não se faz relevante para as faixas de energia de 70 EeV < E < 316 EeV e também a de 100 EeV < E < 316 EeV [4].

Para uma faixa de altíssima energia como $E \leq 10^{11}$ GeV as contribuições são de núcleos mais pesados apenas, como o Si e o Fe, devido ao efeito de foto-desintegração dos núcleos mais leves [4]. Isso explica a distribuição dos UHECR ilustrada nas figuras 14, 15 e 16, com raios de 2, 5 e 8 graus, respectiva-

mente. Essas partículas saem dessas regiões e chegam até a fonte, as simulações trazem informações de onde essas partículas originaram-se ou quais são as possíveis posições iniciais delas no mapa celeste. Para núcleos mais pesados é possível avaliar apenas altíssimas energias devido ao grande efeito do campo magnético Galáctico.

As partículas que se encontram em suas posições iniciais nas fontes podem chegar até à Terra e serem detectadas. Quando essas partículas entram na galáxia elas sofrem a influência do GMF e, após esse contato com o campo magnético Galáctico, essas partículas são distribuídas por toda Galáxia, algumas aca-

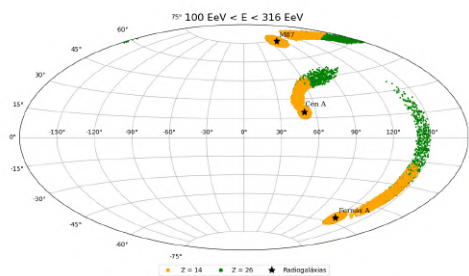


Figura 15: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 5 graus ao redor de cada fonte.

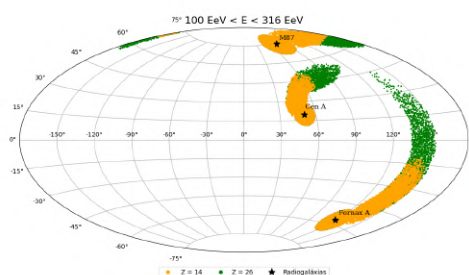


Figura 16: Posições iniciais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos detectados em um raio de 8 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 100 EeV < E < 316 EeV.

bam escapando devido à intensidade do campo magnético [4]. A figura 17 ilustra as posições finais das partículas que entraram na Galáxia na direção das radiogaláxias aqui estudadas. Comparando os plots 8 e 15, observa-se que não existe correlação entre a entrada da partícula e sua detecção próxima à região da fonte, isto mostra o efeito do campo na propagação das partículas dentro da Galáxia e sua importância no estudo de identificação de fontes de raios cósmicos de altas energias.

7 Considerações finais

Na presente estudo, explorou-se as possíveis fontes de raios cósmicos de ultra-altas energias, levando em consideração dados das distribuições de direções de chegada dessas partículas, nas regiões das radiogaláxias [5]. Estudou-se a respeito dos modelos de campos magnéticos Galácticos e foi aplicado o mais atual e mais aprimorado nas simulações, o modelo JF2012. Abordou-se, primeiramente, uma revisão que envolve a propagação dos UHECR, desde a importância do espectro de energia até a contribuição do Observató-

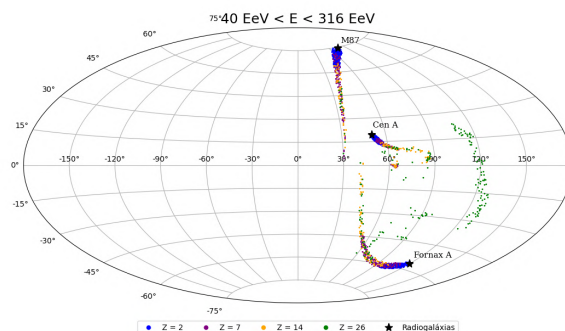


Figura 17: Posições finais em coordenadas galácticas dos raios cósmicos que entraram na Galáxia na posição das radiogaláxias, considerando um raio de 2 graus ao redor de cada fonte. As estrelas pretas representam as posições das fontes, a energia varia entre 40 EeV < E < 316 EeV. Retirado de [4].

rio Pierre Auger.

Foram estudadas e descritas as três possíveis fontes de UHECR, sendo elas: Centaurus A, Fornax A e M87, escolhidas através de dados obtidos pelo Observatório Pierre Auger, que mostra a relevância do estudo de UHECR nessas regiões [4]. Investigou-se o comportamento das partículas provenientes dessas possíveis fontes, com a presença do modelo do campo magnético Galáctico Jansson Farrar. Obteve-se informações das distribuições das posições iniciais dessas partículas nas fontes ou próximas às fontes, e também dados de ângulo de deflexões dessas partículas ao entrarem na Via Láctea.

Discorreu-se todo processo de análise desse estudo. Os primeiros dados obtidos foram a respeito da deflexão de UHECR, utilizando uma energia máxima de 100 EeV e um detector de 0.4 kpc, onde no eixo y da figura tem-se o ângulo de magnitude dado em graus e no eixo x a energia em EeV, nesta análise foi utilizado a componente regular do modelo JF2012. Os mesmos parâmetros foram utilizados nas três possíveis fontes e se observou que a radiogaláxia Fornax A foi a que menos defletiu, ou seja, sofreu menor influência do campo magnético Galáctico, apresentando também uma boa distribuição de partículas de mais alta energia.

Por sua vez, as partículas detectadas originalizadas da Centaurus A, sofreram uma maior deflexão comparada com a Fornax A, porém a distribuição de partículas de mais alta energia foi maior, sendo detectadas partículas de até 100 EeV, a M87 entre as outras duas foi a que mais sofreu a influência do campo magnético Galáctico tendo uma deflexão maior e uma distribuição de partículas de mais altas energias, assim

como a Fornax A.

A segunda análise deu-se com intuito de verificar as posições iniciais dessas partículas detectadas na fonte em coordenadas cartesianas, neste processo variou-se a rigidez e os tamanhos dos detectores. As partículas de rigidez maior, como de 100 EV, mostraram-se próximas às fontes, em rigidezes menores as partículas se encontram ao redor das fontes. Centaurus A e a Fornax A apresentaram resultados parecidos, já a M87 mostrou, novamente, que sofre bastante as influências do campo JF2012. Nessas regiões as partículas se encontram distantes da fonte. Como já discutido anteriormente, o programa utilizado fornece as posições iniciais e finais das partículas. Analisando-se as posições finais observou-se a distribuição dessas partículas em termos de concentrações e as diferenças devido às posições das fontes e do referencial de observação.

A terceira análise expõe as posições finais dos UHECR próximos as radiogaláxias em coordenadas galácticas e, novamente, para rigidezes maiores essas partículas se concentram próximas às fontes e rigidezes menores se mostram distantes, a M87 para um rigidez de 4 EV não apresenta nenhuma partícula detectada, assim, acredita-se, que a intensidade do campo seja maior nessa região.

A última análise fecha a discussão deste trabalho, apresentando-se uma análise das posições de entrada na Galáxia e finais de eventos isotrópicos simulados em mapa celeste. Filtraram-se os UHECR nas direções das fontes na entrada da Galáxia, utilizando raios de 2°, 5° e 8° ao redor de cada fonte, obtendo-se informações que mostram a posição final destas partículas. O contrário também foi realizado, a partir das posições finais aos redor das galáxias aqui estudadas, de eventos simulados isotropicamente, obteve-se sua posição inicial ao entrarem na Via Láctea. A análise mostrou que as partículas de núcleos mais pesados se encontram distantes das fontes, o que já era esperado, no entanto, as duas análises destacam resultados bem diferentes, deixando claro a randomicidade do campo magnético Galáctico.

As simulações aqui apresentadas parcialmente de acordo com os dados observados [4, 11, 17], porém, a inclusão de futuros trabalhos para comparações utilizando as três componentes de campo e em diferentes direções de fontes são relevantes para uma melhor análise e compreensão do efeito do campo Galáctico na propagação de UHECR. Em futuros estudos pretende-se explorar mais as análises aqui descritas,

assim como outras componentes do campo magnético Galáctico JF2012 [19]. O objetivo é explorar o efeito do campo magnético para assim contribuir com a descoberta de fontes de UHECR.

Agradecimentos

LCS agradece a bolsa de pesquisa do programa de pós-graduação em Física Aplicada da Universidade Federal da Integração Latino-Americana. A pesquisa da RCA é apoiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq): 307750/2017-5 e 401634/2018-3. As autoras agradecem ao Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC/MCTI, Brasil) pelo fornecimento de recursos de HPC do supercomputador SDumont (<http://sdumont.lncc.br>), que contribuíram para os resultados da pesquisa relatados neste artigo.. RCA também agradece ao Projeto FAPESP nº 2015/15897-1. RCA e LCS agradecem o apoio financeiro do NAPI “Fenômenos Extremos do Universo” da Fundação de Apoio à Ciência, Tecnologia e Inovação do Paraná.

Sobre as autoras

Larissa Santos (lc.santos.2021@aluno.unila.edu.br) possui graduação em Licenciatura em Ciências Exatas (habilitação em Física) na instituição UFPR - Universidade Federal do Paraná (2020). Estudou na instituição UNIPAR - Universidade Paranaense o curso superior de Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas, durante 1 ano (2014 - 2015). Possui mestrado em Física Aplicada pela instituição UNILA - Universidade Federal da Integração Latino Americana (2023). Trabalha no projeto de pesquisa sobre Raios Cósmicos de ultra-energia UHECR. Atualmente leciona Física e Matemática na rede pública de ensino do Paraná.

Rita de Cássia dos Anjos (ritacassia@ufpr.br) possui graduação em Física Biológica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2007) e mestrado (2009) e doutorado (2014) em Física pela Universidade de São Paulo, São Carlos. Desde agosto de 2014 é professora doutora da Universidade Federal do Paraná no Setor Palotina. Trabalha com raios cósmicos de energias até 100 EeV (Observatório Pierre Auger) e energias entre 10 GeV e 100 TeV (Che-

renkov Telescope Array - CTA). Tem experiência na área de astropartículas, com ênfase na propagação de raios cósmicos, aceleração e interações de partículas cósmicas e fontes de partículas multimessageiras: supernovas, Galáxias Starburst e rádio, AGNs e objetos compactos. É membro do Observatório de Raios Cósmicos Pierre Auger, em Malargue, na Argentina, desde 2014 é membro do Observatório Cherenkov Telescope Array - CTA desde 2015. Em 2020 foi vencedora do prêmio Programa para Mulheres na Ciência, promovido pela L'Oréal Brasil, Unesco Brasil e Academia Brasileira de Ciências. Em 2021 tornou-se membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências. Em 2022 conquistou o Prêmio Anselmo Salles Paschoa, da Sociedade Brasileira de Física. Em 2023 recebeu homenagem da UFR na categoria pesquisadora destaque.

Referências

- [1] M. C. Bustamante, *A descoberta dos raios cósmicos ou o problema da ionização do ar atmosférico*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **35**(2), 2603 (2013).
- [2] J. Linsley, *Evidence for a Primary Cosmic-Ray Particle with Energy 10^{20} eV*, [Phys. Rev. Lett.](#) **10**, 146 (1963).
- [3] R. Alves Batista et al., *Open Questions in Cosmic-Ray Research at Ultrahigh Energies*, [Frontiers in Astronomy and Space Sciences](#) **6** (2019).
- [4] R. C. dos Anjos et al., *Ultrahigh-energy cosmic ray composition from the distribution of arrival directions*, [Phys. Rev. D](#) **98**, 123018 (2018).
- [5] J. H. Matthews et al., *Fornax A, Centaurus A, and other radio galaxies as sources of ultrahigh energy cosmic rays*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **479**(1), L76 (2018). [ArXiv:1805.01902](#).
- [6] Y. B. Bandeira e L. F. Mackedanz, *Mecanismos de limitação da energia de raios cósmicos durante sua propagação*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **41**(4), e20190118 (2019).
- [7] A. Castellina, *AugerPrime: the Pierre Auger Observatory Upgrade*, [EPJ Web of Conferences](#) **210**, 06002 (2019).
- [8] R. C. Anjos, *Propagação de raios cósmicos extragalácticos*, Tese de Doutorado, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (2014).
- [9] J. P. Armand, *Anisotropias no fluxo de Raios Cósmicos de Ultra Altas Energias*, Dissertação de Mestrado, Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo (2018).
- [10] F. M. Rieger, *Active Galactic Nuclei as potential sources of ultra-high energy cosmic rays*, [Universe](#) **8**(11), 607 (2022).
- [11] A. Keivani, G. R. Farrar e M. Sutherland, *Magnetic deflections of ultra-high energy cosmic rays from Centaurus A*, [Astroparticle Physics](#) **61**, 47–55 (2015).
- [12] S. R. Ehlert et al., *Limits on X-Ray Polarization at the Core of Centaurus A as Observed with the Imaging X-Ray Polarimetry Explorer*, [The Astrophysical Journal](#) **935**(2), 116 (2022).
- [13] B. Duah Asabere et al., *Mid-infrared dust in two nearby radio galaxies, NGC 1316 (Fornax A) and NGC 612 (PKS 0131-36)*, [Astronomy & Astrophysics](#) **592**, A20 (2016).
- [14] C. d. OLIVEIRA, *Fontes locais de raios cósmicos ultra energéticos*. (2021).
- [15] G. Farrar, *The Galactic Magnetic Field and its lensing of Ultrahigh Energy and Galactic Cosmic Rays*, in *IAU General Assembly* (2015), vol. 29, 2258479.
- [16] G. R. Farrar, *The Galactic magnetic field and ultrahigh-energy cosmic ray deflections*, [Comptes Rendus Physique](#) **15**(4), 339 (2014), ultrahigh-energy cosmic rays: From the ankle to the tip of the spectrum.
- [17] M. Unger e G. Farrar, *The Coherent Magnetic Field of the Milky Way* (2023). [ArXiv:2311.12120](#).
- [18] R. Jansson e G. R. Farrar, *The galactic magnetic field*, [The Astrophysical Journal](#) **761**(1), L11 (2012).
- [19] R. Jansson e G. R. Farrar, *A New Model of the Galactic Magnetic Field*, [The Astrophysical Journal](#) **757**(1), 14 (2012). [ArXiv:1204.3662](#).

- [20] M. S. Sutherland, B. M. Baughman e J. J. Beatty, *CRT: A numerical tool for propagating ultra-high energy cosmic rays through Galactic magnetic field models*, *Astroparticle Physics* **34**(4), 198 (2010). [ArXiv:1010.3172](#).

Tensões cosmológicas: status atual e perspectivas futuras

Leila L. Graef

Universidade Federal Fluminense

Resumo

Nos últimos anos tem sido reportada na literatura uma crescente discrepância (tensão) nos valores de importantes parâmetros cosmológicos quando inferidos através de diferentes observações. Além de ser um possível indicativo de problemas no Modelo Padrão da Cosmologia, ou na análise dos dados observacionais, a tensão coloca em questão a consistência de certos procedimentos tipicamente adotados na cosmologia. O problema da tensão na constante de Hubble H_0 é considerado por muitos como um dos problemas mais pertinentes da cosmologia atual, e o mesmo está relacionado a um segundo problema, a tensão no parâmetro σ_8 , associado à amplitude das flutuações lineares da matéria. Aqui serão discutidas algumas das razões pelas quais este problema alcançou tamanha relevância, sendo responsável por grande parte dos esforços na cosmologia moderna. Será apresentado também um breve panorama dos principais cenários que têm sido consideradas na tentativa de abordar tais problemas do ponto de vista da cosmologia. Também serão discutidos os principais desafios e perspectivas futuras nesta direção.

Abstract

In recent years, a growing discrepancy (tension) in the values of important cosmological parameters when inferred through different observations has been reported in the literature. In addition to being a possible indication of problems in the Standard Model of Cosmology, or in the analysis of observational data, the tension calls into question the consistency of certain procedures typically adopted in cosmology. The problem of tension in the Hubble constant H_0 is considered by many to be one of the most pertinent problems in current cosmology, and it is related to a second problem, the tension in the parameter σ_8 , associated with the amplitude of linear fluctuations of the matter. Here we will discuss some of the reasons why this problem has achieved such relevance, being responsible for a large part of the efforts in modern cosmology. A brief overview of the main scenarios that have been considered in an attempt to address such problems from the point of view of cosmology will also be presented. The main challenges and future perspectives in this direction will also be discussed.

Palavras-chave: cosmologia, tensões cósmicas, energia escura

Keywords: cosmology, cosmic tensions, dark energy

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44961](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44961)

1 Introdução

A cosmologia pode estar em uma encruzilhada. Dados precisos da Radiação Cósmica de Fundo (RCF) fornecem a condição inicial para a evolução subsequente da formação das estruturas no Universo. Podemos então usar o modelo cosmológico padrão atual, chamado de modelo Λ CDM (Λ *Cold Dark Matter*) para obter uma previsão para a estrutura em larga escala do Universo recente (como a distribuição de galáxias). As observações da estrutura em larga escala do Universo oferecem, assim, um “teste de ponta a ponta” dessa previsão.¹ Há, no entanto, indicações de que este teste de ponta a ponta possa estar

falhando. A evidência mais robusta vem da chamada “tensão na constante de Hubble (H_0)”, que se refere à discrepância no valor da constante de Hubble inferido por diferentes observações. A situação da tensão, conforme relatada em 2016, é ilustrada na Fig. 1 (retirada da Ref. [1]). Se compararmos o método astrofísico da escada de distâncias para medidas locais, um valor de $H_0 = 72,26 \pm 1,19 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ é encontrado, resultando em uma tensão de $3,7\sigma$ com o valor menor encontrado nos dados da RCF em 2016 [1–3]. A figura 1 mostra a função densidade de probabilidade (posterior) de H_0 usando o método de calibração da luminosidade absoluta de SNIa com base no *Tip of Red Giant Branch* - TRGB (curva vermelha) [1]; e com base em Cefeidas [2] (curva azul). O

¹E.Komatsu, [presentation hetdex-pfs](#)

valor obtido por Planck-2016 para de H_0 [3] é mostrado em preto.

Ao se pensar na tensão em H_0 , um outro parâmetro em particular que deve ser levado em consideração é o σ_8 . Este parâmetro é inferido tomando o espectro de potências da matéria na escala de $8 h^{-1} Mpc$, e o mesmo nos dá informações sobre como as flutuações da matéria crescem desde o universo primordial. Os dados do Planck, considerando o modelo padrão, estimam o valor de $\sigma_8 = 0,8099 \pm 0,0059$ [4]. Enquanto isso, medições de estruturas de larga escala feitas localmente por meio de lentes gravitacionais fracas pelo *Kilo-Degree Survey* (KiDS-1000) vinculam o valor $\sigma_8 = 0,766^{+0,021}_{-0,024}$ (veja Ref. [5]). Isso representa uma discrepância da ordem de 3σ a 4σ , ou seja, essa corresponde a uma segunda tensão na cosmologia que tem gerado preocupação. Ocorre que, como discutido na Ref. [6], ao se tentar aliviar a tensão em H_0 com uma nova física (um modelo cosmológico além do padrão) comumente a tensão em σ_8 sofre uma piora. Esta é a tendência observada na maioria dos modelos. Isto nos mostra que, conforme discutido na Ref. [6], o problema das tensões em H_0 e σ_8 devem ser analisados de forma conjunta.

Iremos discutir a seguir como a situação das duas tensões tem evoluído ao longo do tempo, e as propostas que têm surgido no contexto da cosmologia para abordá-las. Iniciaremos discutindo a tensão em H_0

2 A tensão em H_0

Após vários anos de análises e aprimoramento dos dados, a tensão no valor previsto para H_0 entre os dados da RCF e os vínculos diretos não só persistem como vão aumentando com o tempo em diversas análises. Isso pode ser visto claramente na Fig.2 (retirada da Ref. [7]), que mostra uma compilação das previsões para a constante de Hubble a partir de medições relativas ao universo primordial e tardio. Nesta figura são mostrados valores recentes de H_0 vinculados pelo Planck 2018 [4], junto com dados de DES+BAO+BBN, comparados com os vínculos recentes das medições do universo tardio. Entre as medições tardias podemos citar os resultados das colaborações SH0ES, CCHP, MIRAS. Da Fig.2 podemos ver uma diferença de mais de 4σ (e menos de 6σ) entre os vínculos advindos de fontes primordiais e tardias. As duas previsões independentes baseadas nos dados primordiais do Universo são mostrados no

topo esquerda, enquanto o painel do meio mostra medições do Universo tardio com três variantes do método de escada de distância local (SHOES=Cepheids; CCHP=TRGB; MIRAS). O painel inferior mostra combinações das medições (desconsiderando a covariância entre os dados). O valor exato da discrepância depende dos dados considerados e do tratamento dado aos mesmos, e portanto diferentes valores serão encontrados na literatura, implicando em um aumento ou diminuição a tensão. Embora algumas análises recentes chegaram a reivindicar um significativo alívio da tensão, usualmente esta interpretação está associada ao aumento da barra de erro nas medidas, como no caso do trabalho da Ref. [8] por exemplo. Apesar da falta de um consenso sobre o valor exato da tensão, a grande maioria dos trabalhos concorda que atualmente a discrepância entre as medições é da ordem de 4σ a 6σ [9].

O que pode estar falhando? Pelo que entendemos, as possíveis causas da discrepância são: Ou nossas medições de distância e posterior análise de dados estão incorretas; ou o modelo cosmológico que usamos para ajustar todas essas distâncias estão incompletos. Supondo que as medições estejam corretas, encontrar uma solução requer, portanto, descrever um modelo cosmológico que possa fitar as principais distâncias cosmológicas conhecidas. Neste contexto várias possibilidades têm sido investigadas. Entre elas podemos mencionar abordagens que incluem desde variar o número de espécies relativísticas do universo ou o comportamento da energia escura e/ou da matéria escura até adicionar curvatura espacial no universo, ou mesmo alterar a temperatura de monopolo da RCF. Outra possibilidade importante neste contexto é considerar um curto período de domínio da energia escura no universo antigo (os chamados modelos de *early dark energy*), ou também considerar alternativas à inflação padrão (para um *review* das várias propostas veja por exemplo as Refs. [9] e [10]). Apesar dos esforços para resolver este problema, o único consenso até agora foi que medições futuras juntamente com uma melhor compreensão do problema são necessárias para esclarecer a causa da tensão.

3 A tensão em σ_8

Ao se modificar a taxa de expansão nos primeiros instantes do universo, ou ao adicionar nova física na era pós-recombinação, ou mesmo mudando a igual-

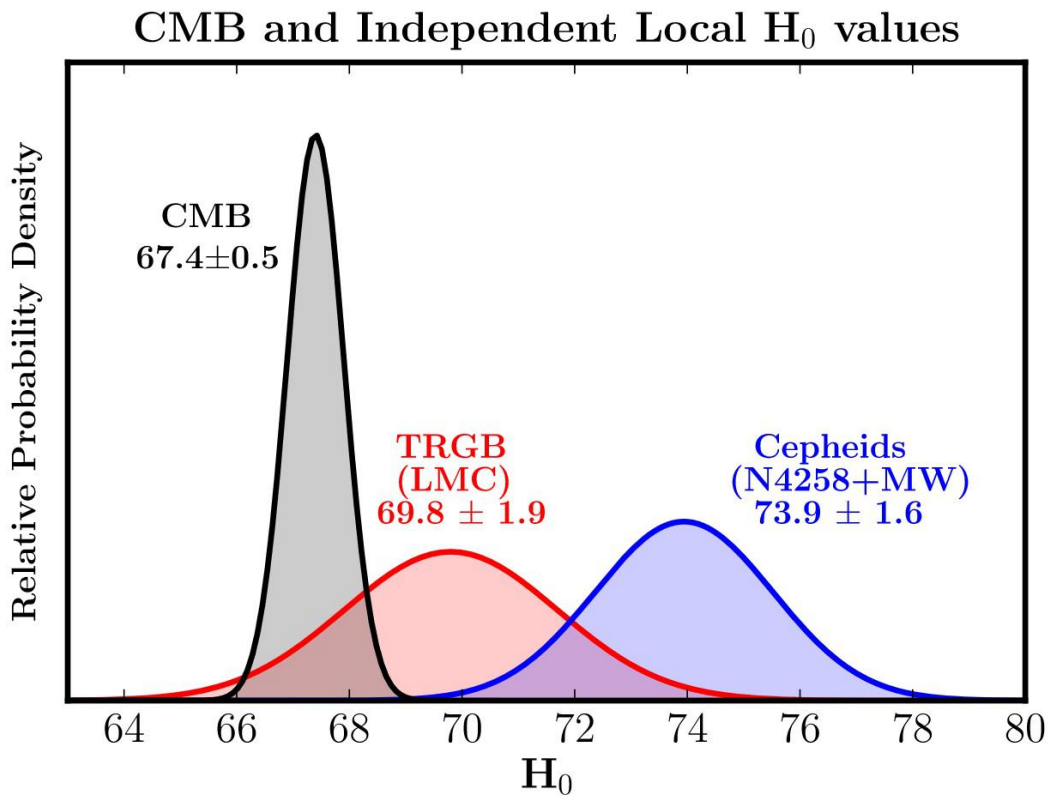


Figura 1: Fig. retirada da Ref. [1]. A figura mostra a função densidade de probabilidade (posterior) de H_0 usando o método de calibração da luminosidade absoluta de SNIa com base no *Tip of Red Giant Branch* - TRGB (curva vermelha) [1]; e com base em Cefeidas [2] (curva azul). O valor obtido por Planck-2016 [3] para H_0 é mostrado em preto.

dade matéria-energia escura para antes do previsto no modelo Λ CDM, o valor inferido para a constante H_0 é deslocado para um novo valor. No entanto, o valor da taxa de expansão atual do universo não pode ser inferido sem considerar toda a evolução do universo, pois o mesmo depende dos demais parâmetros que descrevem a evolução do universo. Devemos lembrar que $H_0 \equiv H(z=0)$ é meramente um valor em um instante, de uma descrição dinâmica da expansão cosmológica. Portanto, o mesmo deve ser estudado em conjunto com os demais parâmetros cosmológicos, especialmente o parâmetro σ_8 , cujo vínculo é fortemente afetado pelo valor de H_0 .

A tensão em σ_8 é ilustrada na figura 3, a qual mostra os contornos de confiança para σ_8 obtidos por diferentes colaborações. Esta tensão também pode ser ilustrada pela Figura 4, a qual mostra as barras de erro no parâmetro S_8 , o qual é relacionado com o σ_8 de acordo com a definição $S_8 \equiv \sigma_8 \sqrt{\Omega_m/0.3}$. Na figura vemos que, preferindo um valor mais alto para o parâmetro S_8 existem as medições dos dados do primeiro ano do HSC, para os quais $S_8 = 0,804^{+0,032}_{-0,029}$.

Já prevendo um valor inferior, $S_8 = 0,703 \pm 0,045$, existe a estimativa do BOSS *Galaxy Power Spectrum* [11]. Foi apontado [12] que essa tensão poderia estar relacionada ao excesso de lente medido pelo Planck, vinculando um S_8 maior. No entanto, ACT+WMAP também encontrou um valor grande para $S_8 = 0,840 \pm 0,030$, mesmo sem vincular uma amplitude peculiar para o lenteamento.

Como mencionado anteriormente, ao se tentar aliviar a tensão em H_0 considerando-se extensões do modelo Λ CDM, a nova física que aumenta a taxa de expansão atual geralmente suprime a formação de estruturas, o que leva a um aumento da densidade de matéria escura fria, elevando a tensão em σ_8 na maioria dos modelos. Esta dinâmica ficará mais clara a seguir ao discutirmos como extensões do Modelo Padrão alteram as principais grandezas cosmológicas envolvidas no problema da tensão.

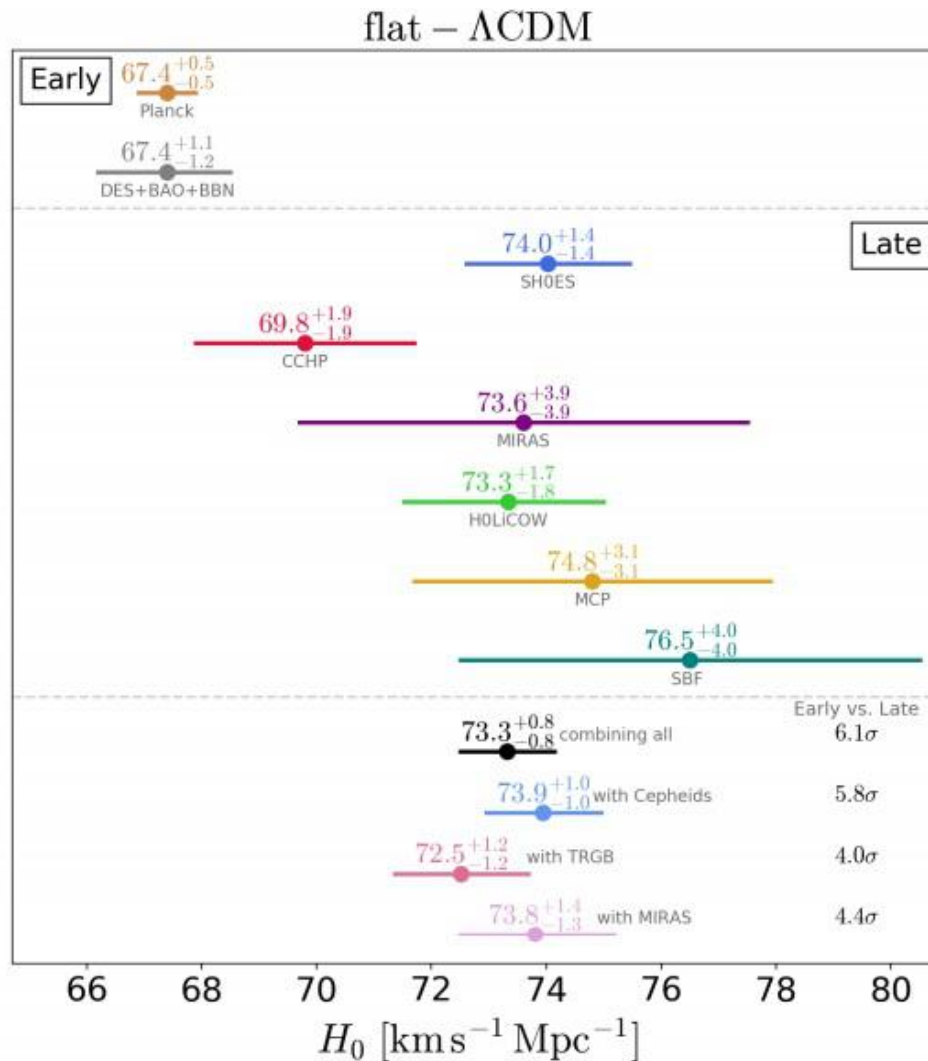


Figura 2: Fig. Retirada da Ref. [7]. Compilação de previsões para a constante de Hubble retiradas da literatura recente. Duas previsões independentes baseadas em os dados iniciais do Universo [4] são mostrados no topo esquerda, enquanto o o painel do meio mostra medições do Universo tardio com três variantes do método de escada de distância local. O painel inferior mostra combinações das medições (desconsiderando a covariância entre os dados).

4 Extensões do modelo padrão da Cosmologia

A origem das tensões ainda é tema de muito debate. Embora possam ser o resultado de efeitos sistemáticos desconhecidos, elas poderiam ser consequências também de uma nova física além do modelo Λ CDM. Muitos modelos foram propostos na literatura com o objetivo de resolver uma ou mesmo ambas as tensões. Para a tensão no parâmetro de Hubble, esses modelos foram classificados como soluções de tempos antigos quando uma nova física pré-recombinação é adicionada, e como soluções tardias para o caso de extensões pós-recombinação.

As soluções de tempos antigos visam aumentar o tamanho físico do horizonte sonoro no último espa-

lhamento, o que leva a um aumento em H_0 . Isso pode ser feito de diferentes maneiras, por exemplo, aumentando $H(z)$ antes da recombinação [13], [14] considerando componentes adicionais, alterando o *redshift* do último espalhamento, ou o *redshift* da igualdade matéria-radiação ao considerar uma nova física na era pós-recombinação [15–19], ou mesmo alterando a velocidade do som do fluido fóton/bárion (para uma revisão veja [10, 20]).

É possível também se considerar modificações ainda mais antigas na física durante a era da inflação, as quais poderiam implicar em um valor ainda mais alto para H_0 [21–23]. Por outro lado as soluções tardias pra tensão de H_0 buscam aumentar a taxa

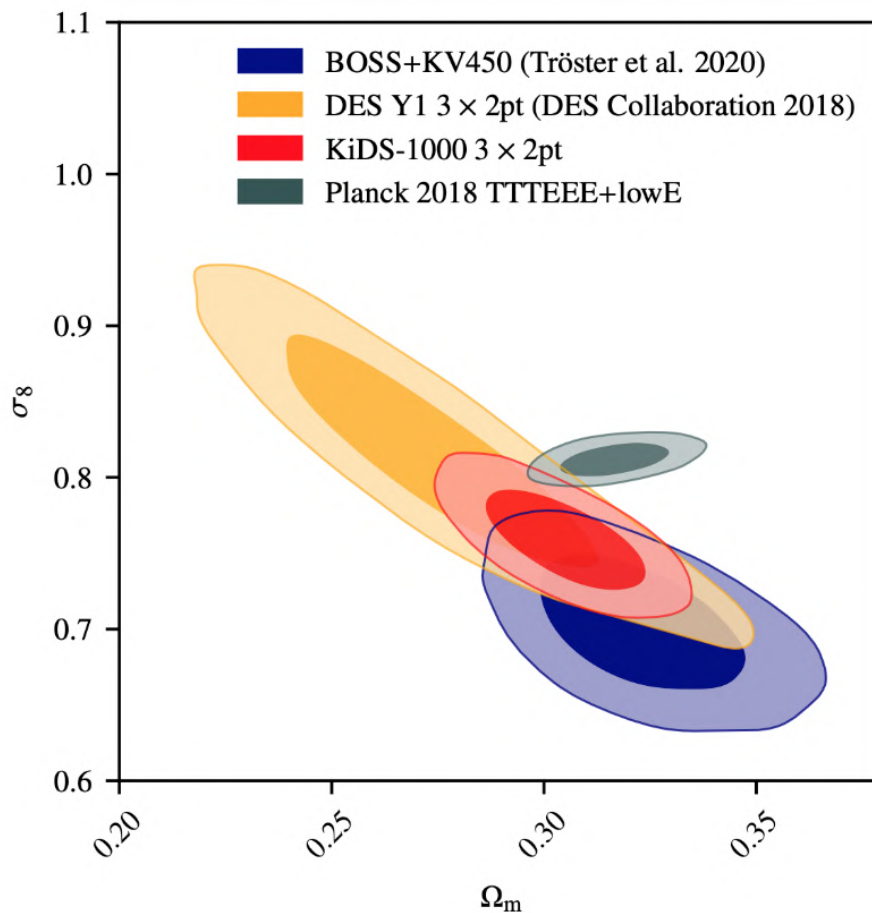


Figura 3: Contornos de confiança (68% CL e 95% CL) de σ_8 e Ω_m obtidos por diferentes colaborações (Figura retirada da Ref. [11]).

de expansão atual de maneira mais direta [9, 19, 24]. Já com relação à tensão em σ_8 , a maioria dos modelos propostos para resolvê-la são baseados em uma diminuição do valor previsto para Ω_m ou em uma supressão tardia do espectro da matéria.

Grande parte das extensões do modelo Λ CDM propostas neste contexto exibem uma correlação positiva entre os parâmetros H_0 e σ_8 , onde um aumento em H_0 implica em um aumento em σ_8 , ou vice versa [9, 25, 26], levando a um agravamento de uma das tensões enquanto a outra é aliviada. Existem, no entanto, algumas classes de modelos que alegam aliviar ambas as tensões. Entre eles podemos mencionar algumas classes de modelos de interação matéria/energia escuras [16–19, 27], alguns novos modelos de energia escura antiga - *new early dark energy* [28–30] (veja também Refs. [31–33]), modificações na inflação padrão [21–23], modelos com alteração tardia da equação de estado da matéria escura [15], entre outras propostas (veja também o modelo da Ref. [34]

por exemplo). No entanto estes modelos ainda merecem uma investigação mais aprofundada para serem confirmados como soluções viáveis para as tensões cosmológicas.

Embora nenhum mecanismo simples tenha sido confirmado como capaz de resolver ambas tensões, é importante se compreender melhor como cada um deles está relacionado e como eles impactam os parâmetros H_0 , r_s e σ_8 . Para ilustrar o efeito de como uma nova física no universo antigo/tardio pode impactar os parâmetros relacionados às tensões, vamos aqui tomar como exemplo os casos dos modelos com número extra de espécies relativísticas, N_{eff} (universo antigo), e também modelos de quintessência com equação de estado $w \neq -1$ (universo tardio).

Iniciando pelo primeiro exemplo, ao assumir uma geometria plana para o universo, o parâmetro de Hubble $H(z)$ pode ser relacionado ao número efetivo de espécies relativísticas N_{eff} através da expressão

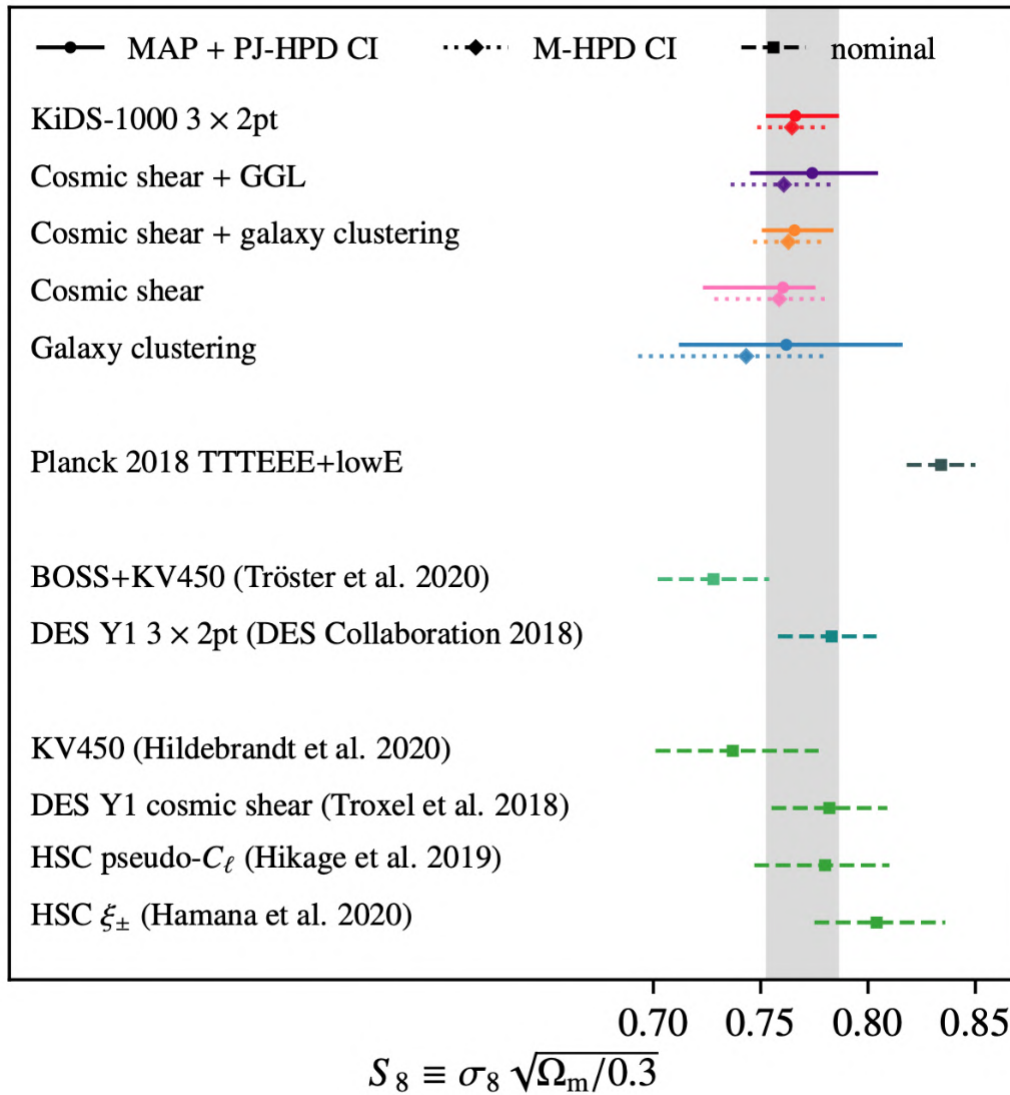


Figura 4: Gráfico mostrando as barras de erro de S_8 (68% C.L.) Figura retirada da Ref. [11]

abaixo (veja Ref. [35] para maiores detalhes),

$$\frac{H(z)}{H_0} = \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_\gamma (1 + 0.2271 N_{eff}) (1+z)^4 + \Omega_\Lambda \right]^{1/2}, \quad (1)$$

onde a densidade total de matéria Ω_m é a soma de Ω_{cdm} e Ω_b , matéria escura fria e bárions, respectivamente; Ω_γ representa a densidade de fótons (fixada pela temperatura da RCF), enquanto Ω_Λ indica a constante cosmológica. A partir da expressão acima é fácil ver como, ao alterar o valor de N_{eff} em relação ao padrão, altera-se a evolução de $H(z)$.

No que diz respeito ao universo recente, podemos ver a conexão entre o parâmetro de Hubble e a equação de estado da atual componente dominante do universo ao escrever a equação de evolução do *back-ground* como a seguir,

$$\frac{H(z)}{H_0} = \left[\Omega_m (1+z)^3 + \Omega_r (1+z)^4 + \Omega_\Lambda (1+z)^{3(1+w)} \right]^{1/2}, \quad (2)$$

onde w é a equação de estado da componente dominante do universo tardio, considerada como sendo a energia escura. Note que estamos assumindo um universo plano, portanto $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_m - \Omega_r$. Veja que

uma equação de estado $w = -1$ recupera a constante cosmológica, cuja evolução independe do *redshift*, enquanto que diferentes valores de w levam à evoluções diferentes para $H(z)$.

A tensão em H_0 também pode ser pensada da perspectiva de uma incompatibilidade no horizonte sonoro no último espalhamento, r_s . A estimativa da colaboração SH0ES combinada com dados de BAO+Pantheon requerem $r_s \sim 137$ Mpc, enquanto que dados do Planck assumindo o modelo Λ CDM indicam $r_s \sim 147$ Mpc. Isto significa que uma diferença de 10 Mpc ($\sim 5\%$) na estimativa do horizonte sonoro no último espalhamento poderia resolver a tensão em H_0 [36].

O horizonte sonoro no último espalhamento (*redshift* z_*) é dado pela seguinte expressão,

$$r_s = \int_{z_*}^{\infty} dz \frac{c_s(z)}{H(z)} \quad (3)$$

onde usamos $r_s(z_*) = r_s$ por simplicidade. Acima, $c_s(z)$ é a velocidade do som do fluido fóton/bárion.

Já o tamanho angular do horizonte sonoro, θ_s , é dado por,

$$\theta_s = \frac{r_s}{D_A(z_*)}, \quad (4)$$

onde a distância de diâmetro angular, D_A , é uma quantidade dependente de modelo, como mostra sua expressão abaixo,

$$D_A(z_*) = \frac{1}{1+z_*} \int_0^{z_*} dz \frac{1}{H(z)}. \quad (5)$$

Quanto menor é o tamanho angular do horizonte sonoro, mais os picos do espectro da RCF são deslocados para as menores escalas (maiores multipolos). Isto pode ser compensado ao se aumentar a taxa de expansão no universo antigo, por exemplo via uma contribuição extra á N_{eff} [37], ou ao alterar a taxa de expansão atual [20]. No primeiro caso, um aumento no número de espécies relativísticas no momento da recombinação é capaz de tanto aumentar o valor de H_0 como diminuir o valor de r_s , movendo as duas quantidades na direção correta para aliviar a tensão (embora não o suficiente para resolvê-la) [36–38]. Já no segundo caso, o valor de $D_A(z_*)$ decresce, recuperando um valor alto de θ_s consistente com o valor previsto por Planck, enquanto que r_s não é significativamente afetado.

É importante mencionar aqui um outro problema que ocorre frequentemente na abordagem usual de

modelos que consideram extensões do Modelo Padrão para aliviar as tensões. Um procedimento comum consiste em adicionar novos parâmetros além dos 6 do Λ CDM, o que aumenta a complexidade do modelo cosmológico. No caso em que se deixam esses parâmetros livres para variar na análise, isto pode resultar em grandes incertezas em H_0 . Isto muitas vezes é considerado (questionavelmente) como um alívio na tensão por permitir com estes dados um espaço de parâmetros mais próximo do previsto pelas medidas locais, porém sem um verdadeiro deslocamento no valor médio de H_0 inferido via dados da RCF (para uma melhor discussão sobre o assunto veja Ref. [9]). Ou seja, este procedimento tende a aumentar a barra de erro devido ao parâmetro livre, causando um aparente relaxamento na tensão devido ao alargamento no posterior, em vez de uma mudança genuína no valor central de H_0 .

Para evitar este problema, em alguns trabalhos foi considerada uma abordagem empírica que assume valores específicos fixos diferentes do padrão nas extensões do Λ CDM (ao invés de considerar parâmetros livres) [25, 39]. A partir daí analisou-se como os parâmetros importantes no contexto da tensão variavam de acordo. Considerando este tipo de análise, no trabalho da Ref. [6] propusemos uma ferramenta ilustrativa para auxiliar na classificação e comparação de grandes quantidades de modelos em relação às suas performances com respeito à ambas as tensões. Neste trabalho fixamos diferentes valores para o parâmetro extra de diversas extensões do modelo padrão e através de uma análise estatística os valores inferidos para H_0 e σ_8 para cada cenário foram plotados. Foi mostrado como o plano H_0/σ_8 resultante é capaz de ilustrar claramente a situação da correlação entre H_0 e σ_8 em cada modelo. Este método pode ser usado como diagnóstico para se analisar candidatos a resolverem as tensões.

Devido á frequente correlação observada entre a tensão em H_0 e σ_8 , é importante ressaltar a necessidade de se analisar ambas as tensões em conjunto, para buscar entender quais classes de modelos e com quais características vão na direção correta do espaço de parâmetros para quebrar a degenerescência entre as duas tensões. Tais análises, além de auxiliar em uma compreensão geral do papel de cada parâmetro extra nas tensões, também deverão auxiliar na compreensão do papel de cada conjunto de dados em vincular os parâmetros importantes neste contexto. Tais esforços teóricos nos permitirão fazer melhor pro-

veito da grande quantidade de dados observacionais que estão por vir e que deverão dar grandes contribuições neste contexto. Um melhor entendimento do problema das tensões cosmológicas, em última instância nos permitirá testar a consistência de procedimentos fundamentais adotados na cosmologia.

5 Perspectivas

O problema das tensões é um dos problemas da cosmologia que mais tem ganhado atenção na literatura recente. Após anos de análises observacionais, e diversos modelos sendo propostos, a tensão se mantém um crescente problema. Dado o grande número de modelos propostos neste contexto, o momento é oportuno para se buscar, a partir do panorama de modelos construídos, análises gerais e comparativas [6], e que considerem ambas tensões em conjunto, a fim de compreender quais características favorecem os modelos mais promissores. Isto também deverá ajudar a esclarecer qual o papel dos mecanismos extras ao modelo padrão considerados no universo antigo comparado aos mecanismos considerados no universo recente, quais combinações de mecanismos primordiais e tardios são mais promissoras e por quê.

Na parte observacional as perspectivas são bastante promissoras. Em um futuro próximo são esperadas medições da taxa de expansão do universo e da história de crescimento nos experimentos mais diversos. Para os vínculos em H_0 , na próxima década, um papel importante será desempenhado pelas sirenes padrão (GWSS), o análogo gravitacional das velas padrão astronômicas [40–43]. As observações da fusão do sistema binário de estrelas de nêutrons GW170817231 forneceu recentemente o valor $H_0 = 70_{-8}^{+12} \text{ km/s/Mpc}$ [44]. Embora este vínculo ainda possua grande incerteza, tal método tem a vantagem de não requerer qualquer forma de “escada de distância” cósmica além de ser mais independente do modelo. Uma incerteza de 1-2% em H_0 é esperada nos próximos anos, a partir da análise de eventos de ondas gravitacionais com equivalentes eletromagnéticos.

Em outro contexto, um papel importante também deverá ser desempenhado pelos telescópios SKA e medição de lentes gravitacionais fracas usando mapeamento de intensidade de 21 cm [45–47]. Um grande avanço será dado também pelos futuros experimentos de CMB, como o Observatório Simon ou

CMB-S4 [48], que combinado com gigantescos levantamentos cósmicos, como Euclid e LSST [49, 50] espera-se que atinja uma incerteza de 0,15% na estimativa de H_0 . Todos destes esforços deverão revelar uma causa sistemática ou levar a uma revisão do Modelo Padrão da Cosmologia.

A próxima década construirá a geração de experimentos que dará início a uma nova era da cosmologia. Com ela o Modelo Padrão e suas extensões poderão ser testados de forma sem precedentes. Veremos se isto nos mostrará uma resolução deste cenário de tensão crescente, ou se nos indicará um novo caminho na busca da compreensão destas questões.

Agradecimentos

L.L.G agradece ao suporte da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), Grant No. E-26/201.297/2021 e ao CNPq Grant No. 307636/2023-2.

Sobre a autora

A autora Leila L. Graef (leilagraef@id.uff.br) fez sua pós-graduação na Universidade de São Paulo e pós doutorado na McGill University, no Observatório Nacional e na Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Atualmente é Professora Adjunta do Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense (UFF), onde leciona, orienta estudantes de pós-graduação e desenvolve pesquisa. É membro do Cosmoverse e da colaboração NANOGrav. Tem experiência em Cosmologia e Gravitação, atuando principalmente nos seguintes temas: universo primordial, gravitação quântica, ondas gravitacionais estocásticas, energia escura e o problema das tensões cosmológicas.

Referências

- [1] W. L. Freedman et al., *The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch*, *The Astrophysical Journal* **882**(1), 34 (2019).

- [2] A. G. Riess et al., *A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant*, *The Astrophysical Journal* **826**(1), 56 (2016).
- [3] Planck Collaboration et al., *Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **594**, A13 (2016). [ArXiv:1502.01589](#).
- [4] Planck Collaboration et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020). [ArXiv:1807.06209](#).
- [5] M. Asgari et al., *KiDS-1000 cosmology: Cosmic shear constraints and comparison between two point statistics*, *Astronomy & Astrophysics* **645**, A104 (2021). [ArXiv:2007.15633](#).
- [6] I. d. O. C. Pedreira et al., *Visual tool for assessing tension-resolving models in the H_0 - σ_8 plane*, *Physical Review D* **109**(10), 103525 (2024). [ArXiv:2311.04977](#).
- [7] L. Verde, T. Treu e A. G. Riess, *Tensions between the early and late Universe*, *Nature Astronomy* **3**(10), 891 (2019).
- [8] P. L. Kelly et al., *The Magnificent Five Images of Supernova Refsdal: Time Delay and Magnification Measurements*, *The Astrophysical Journal* **948**(2), 93 (2023).
- [9] E. Di Valentino et al., *In the realm of the Hubble tension—a review of solutions*, *Classical and Quantum Gravity* **38**(15), 153001 (2021). [ArXiv:2103.01183](#).
- [10] N. Schöneberg et al., *The H_0 Olympics: A fair ranking of proposed models*, *Physics Reports* **984**, 1 (2022). [ArXiv:2107.10291](#).
- [11] C. Heymans et al., *KiDS-1000 Cosmology: Multi-probe weak gravitational lensing and spectroscopic galaxy clustering constraints*, *Astronomy & Astrophysics* **646**, A140 (2021). [ArXiv:2007.15632](#).
- [12] E. Di Valentino e S. Bridle, *Exploring the Tension between Current Cosmic Microwave Background and Cosmic Shear Data*, *Symmetry* **10**(11) (2018).
- [13] M. Benetti, L. L. Graef e J. Alcaniz, *The H_0 and σ_8 tensions and the scale invariant spectrum*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2018**(07), 066 (2018).
- [14] L. L. Graef, M. Benetti e J. S. Alcaniz, *Primordial gravitational waves and the H_0 -tension problem*, *Phys. Rev. D* **99**, 043519 (2019).
- [15] K. Naidoo et al., *Dark matter solution to the H_0 and S_8 tensions, and the integrated Sachs-Wolfe void anomaly*, *Physical Review D* **109**(8), 083511 (2024). [ArXiv:2209.08102](#).
- [16] M. Benetti et al., *Looking for interactions in the cosmological dark sector*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2019**(12), 023 (2019).
- [17] H. Borges et al., *Testing the growth rate in homogeneous and inhomogeneous interacting vacuum models*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2023**(06), 009 (2023).
- [18] M. Benetti et al., *Dark sector interactions and the curvature of the universe in light of Planck’s 2018 data*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**(8), 014 (2021).
- [19] V. Salzano et al., *J-PAS: forecasts on interacting vacuum energy models*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**(09), 033 (2021).
- [20] L. Knox e M. Millea, *Hubble constant hunter’s guide*, *Phys. Rev. D* **101**, 043533 (2020).
- [21] J. G. Rodrigues et al., *Higgs inflation: Constraining the top quark mass and breaking the $H_0 - \sigma_8$ correlation*, *Physics Letters B* **852**, 138607 (2024). [ArXiv:2301.11788](#).
- [22] J. G. Rodrigues, M. Benetti e J. S. Alcaniz, *Possible discrepancies between cosmological and electroweak observables in Higgs Inflation*, *Journal of High Energy Physics* **2021**(11), 91 (2021). [ArXiv:2105.07009](#).
- [23] J. G. Rodrigues et al., *Probing the seesaw mechanism with cosmological data*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2020**(7), 007 (2020). [ArXiv:2002.05154](#).

- [24] E. Abdalla et al., *Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies*, *Journal of High Energy Astrophysics* **34**, 49 (2022). [ArXiv: 2203.06142](#).
- [25] R. de Sá, M. Benetti e L. Graef, *An empirical investigation into cosmological tensions*, *European Physical Journal Plus* **137**(10), 1129 (2022). [ArXiv:2209.11476](#).
- [26] K. Jedamzik, L. Pogosian e G.-B. Zhao, *Why reducing the cosmic sound horizon alone can not fully resolve the Hubble tension*, *Communications Physics* **4**(1), 123 (2021). [ArXiv: 2010.04158](#).
- [27] E. Di Valentino et al., *Interacting dark energy in the early 2020s: A promising solution to the H_0 and cosmic shear tensions*, *Physics of the Dark Universe* **30**, 100666 (2020). [ArXiv:1908.04281](#).
- [28] J. S. Cruz, F. Niedermann e M. S. Sloth, *Cold New Early Dark Energy pulls the trigger on the H_0 and S_8 tensions: a simultaneous solution to both tensions without new ingredients*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2023**(11), 033 (2023). [ArXiv:2305.08895](#).
- [29] V. Pettorino, L. Amendola e C. Wetterich, *How early is early dark energy?*, *Phys. Rev. D* **87**, 083009 (2013). [ArXiv:1301.5279](#).
- [30] V. Poulin et al., *Early Dark Energy can Resolve the Hubble Tension*, *Phys. Rev. Lett.* **122**, 221301 (2019).
- [31] A. Reeves et al., *Restoring cosmological concordance with early dark energy and massive neutrinos?*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **520**(3), 3688 (2023). [ArXiv:2207.01501](#).
- [32] L. Herold e E. G. M. Ferreira, *Resolving the Hubble tension with early dark energy*, *Physical Review D* **108**(4), 043513 (2023). [ArXiv: 2210.16296](#).
- [33] L. Herold, E. G. M. Ferreira e E. Komatsu, *New Constraint on Early Dark Energy from Planck and BOSS Data Using the Profile Likelihood*, *The Astrophysical Journal Letters* **929**(1), L16 (2022).
- [34] S. Basilakos et al., *Alleviating both H_0 and σ_8 tensions in Tsallis cosmology*, *European Physical Journal C* **84**(3), 297 (2024). [ArXiv: 2308.01200](#).
- [35] M. Maggiore, *Gravitational wave experiments and early universe cosmology*, *Physics Reports* **331**(6), 283 (2000). [ArXiv:gr-qc/9909001](#).
- [36] J. L. Bernal, L. Verde e A. G. Riess, *The trouble with H_0* , *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2016**(10), 019 (2016). [ArXiv: 1607.05617](#).
- [37] N. Arendse et al., *Cosmic dissonance: are new physics or systematics behind a short sound horizon?*, *Astronomy & Astrophysics* **639**, A57 (2020). [ArXiv:1909.07986](#).
- [38] X. Zhang e Q.-G. Huang, *Hubble constant and sound horizon from the late-time Universe*, *Phys. Rev. D* **103**, 043513 (2021).
- [39] S. Vagnozzi, *New physics in light of the H_0 tension: An alternative view*, *Physical Review D* **102**(2), 023518 (2020). [ArXiv:1907.07569](#).
- [40] B. F. Schutz, *Determining the Hubble constant from gravitational wave observations*, *Nature* **323**(6086), 310 (1986).
- [41] D. E. Holz e S. A. Hughes, *Using Gravitational-Wave Standard Sirens*, *The Astrophysical Journal* **629**(1), 15 (2005). [ArXiv:astro-ph/0504616](#).
- [42] H.-Y. Chen, M. Fishbach e D. E. Holz, *A two per cent Hubble constant measurement from standard sirens within five years*, *Nature* **562**(7728), 545 (2018). [ArXiv:1712.06531](#).
- [43] E. Di Valentino et al., *Cosmological impact of future constraints on H_0 from gravitational-wave standard sirens*, *Physical Review D* **98**(8), 083523 (2018). [ArXiv:1806.07463](#).
- [44] B. P. Abbott et al., *A gravitational-wave standard siren measurement of the Hubble constant*, *Nature* **551**(7678), 85 (2017). [ArXiv: 1710.05835](#).

- [45] A. Pourtsidou e R. B. Metcalf, *Gravitational lensing of cosmological 21 cm emission*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **448**(3), 2368 (2015).
- [46] M. Santos et al., *Cosmology from a SKA HI intensity mapping survey*, in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)* (2015), 19. [ArXiv:1501.03989](#).
- [47] P. Bull et al., *Measuring baryon acoustic oscillations with future SKA surveys*, in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)* (2015), 24. [ArXiv:1501.04088](#).
- [48] K. N. Abazajian et al., *CMB-S4 Science Book, First Edition* (2016). [ArXiv:1610.02743](#).
- [49] G. Fanizza, *Precision Cosmology and Hubble tension in the era of LSS surveys*, in *The Sixteenth Marcel Grossmann Meeting* (World Scientific, 2023), 1792–1802.
- [50] C. A. P. Bengaly, C. Clarkson e R. Maartens, *The Hubble constant tension with next-generation galaxy surveys*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2020**(5), 053 (2020). [ArXiv:1908.04619](#).

Enriquecimento químico nos centros em aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios observados com *Suzaku*

Rebeca M. Batalha^{1,2}, Renato A. Dupke² e Yolanda Jiménez-Teja³

¹Université Paris-Saclay

²Observatório Nacional

³Instituto de Astrofísica de Andalucía

Resumo

Este estudo investiga a distribuição da fração de massa de Ferro (Fe) proveniente de Supernovas do Tipo II (SNII) em comparação com Supernovas do Tipo Ia (SNIa) em dezoito aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios observados com *Suzaku*. Utilizando os modelos teóricos de explosões de supernovas mais bem avaliados por [1], calculamos tal fração a partir de oito razões de abundância nas regiões dos núcleos frios e em suas regiões externas. A região interna demonstra uma contribuição menor da fração de massa de Fe de SNII/SNIa em comparação com a região externa. A média ponderada das frações de massa de Fe de SNII/SNIa, derivada das oito razões de abundância medidas, aumenta de $17,0 \pm 0,2$ para $21,3 \pm 0,6$. Esse aumento médio indica que a região interna possui uma fração percentual de massa de Fe proveniente de SNIa maior do que na região externa. Entre os mecanismos de enriquecimento químico em aglomerados e grupos de galáxias, este resultado sugere que a pressão de arraste na região central desses aglomerados de galáxias desempenha um papel crucial no enriquecimento químico dessas regiões, corroborando descobertas anteriores.

Abstract

This study investigates the distribution of the mass fraction of Iron (Fe) from Type II Supernovae (SNII) compared to Type Ia Supernovae (SNIa) in eighteen clusters and groups of galaxies with cold cores observed with *Suzaku*. Using the theoretical models of supernova explosions best evaluated by [1], we calculated this fraction from eight abundance ratios in the cold core regions and their external regions. The inner region demonstrates a smaller contribution of Fe mass fraction from SNII/SNIa compared to the outer region. The weighted average Fe mass fractions of SNII/SNIa, derived from the eight measured abundance ratios, increase from 17.0 ± 0.2 to 21.3 ± 0.6 . This average increase indicates that the inner region has a higher percentage mass fraction of Fe originating from SNIa than in the outer region. Among the mechanisms of chemical enrichment in galaxy clusters and groups, this result suggests that the drag pressure in the central region of these galaxy clusters plays a crucial role in the chemical enrichment of these regions, corroborating previous findings.

Palavras-chave: astrofísica, supernovas, meio intra-aglomerado, meio intragrupo

Keywords: astrophysics, supernovae, intra-cluster medium, intragroup medium

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44962](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44962)

1 Introdução

A distribuição dos elementos químicos no meio intra-aglomerado (do inglês, *intra-cluster medium* ou ICM) e no meio intragrupo (do inglês, *intragroup medium* ou IGrM) desempenha um papel crucial na compreensão do enriquecimento químico de aglomerados e grupos de galáxias. Este meio é permeado por elementos pesados, essencialmente provenientes de diversas fontes. Supernovas do tipo Ia (SNIa) produzem abundantemente elementos como oxigênio, neônio, magnésio e quantidades consideráveis

de silício, argônio e cálcio (para uma revisão, consulte [2], [3], e [4]). Enquanto supernovas por colapso do núcleo (SNcc) produzem majoritariamente elementos do grupo do Ferro (Fe), como o próprio ferro, níquel, manganês e crômio (para uma revisão, consulte [5]). Neste contexto, SNcc englobam as supernovas do tipo II (SNII), incluindo hipernovas produzidas por instabilidade de pares. Assim, as razões de abundância, como a razão entre um elemento E e Fe, fornecem pistas valiosas sobre os processos de enriquecimento químico nesses objetos, uma vez que diferentes supernovas (SNe) produzem e ejetam dife-

rentes quantidades de elementos pesados.

Os processos envolvidos no enriquecimento do ICM e sua importância relativa ainda estão em aberto. Diversos mecanismos de transporte e mistura de metais contribuem para o enriquecimento químico desses sistemas de galáxias [6, 7, para uma revisão, consulte]. Eles podem ter sido injetados por Ventos Galácticos (em inglês, *galactic winds*) energéticos de Supernovas do Tipo II [8], por Pressão de Arrasto (em inglês, *Ram Pressure Stripping* - RPS) de galáxias capturadas pelo aglomerado [9], o enriquecimento de metal do ICM poderia ter acontecido no meio antes da virialização do aglomerado [10].

A relevância de cada um desses mecanismos pode ser avaliada em comparação com os produtos ejetados por SNe. Esses produtos, também conhecidos como *yields*, são previstos pelos modelos de explosão de SNe. Esse aspecto já foi abordado em um estudo anterior com o intuito de diminuir as divergências quanto aos produtos previstos para diferentes tipos de supernovas pelos diversos modelos teóricos de explosão encontrados na literatura [11]. Uma vez justificada a escolha dos modelos teóricos de SNe, a fração de massa de Fe proveniente de um tipo de SN pode oferecer pistas sobre a relevância entre os mecanismos de enriquecimento.

Neste estudo, investigamos a contribuição relativa de SNII/SNIa por meio da fração de massa de Fe proveniente desta razão, analisando a abundância de ferro nas regiões centrais de aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios. Utilizamos uma abordagem que combina modelos teóricos de SNIa e SNII, especificamente os modelos de detonação retardada em três dimensões propostos por [12] e o modelo SNII com metalicidade inicial de 0,02 de [13]. Essa escolha é baseada pelos resultados do estudo recente de [1], que avaliou a capacidades desses modelos de prever o padrão de distribuição de razões de abundâncias observadas em dezoito sistemas de galáxias.

Ao calcular a fração percentual de massa de Fe proveniente de SNII, analisamos diferentes razões de abundância, comparando os resultados para as regiões interna e externa dos aglomerados e grupos selecionados. O objetivo é discernir padrões e variações na contribuição relativa de cada tipo de fonte de SN, proporcionando uma visão mais aprofundada sobre os mecanismos de enriquecimento em diferentes regiões do meio intra-aglomerado.

2 Amostra de aglomerados e grupos de galáxias

Consideramos os ajustes espectrais da amostra de aglomerados e grupos de galáxias observados pelo instrumento XIS a bordo do satélite *Suzaku*, conforme descrito em [1]. A análise é baseada em dezoito grupos e aglomerados de galáxias próximos ($z \leq 0,0391$), observados com o espectrômetro XIS a bordo do satélite *Suzaku*. Suas propriedades estão listadas na Tabela 1 do artigo.

Seleção de regiões de interesse

Neste estudo, estabelecemos três regiões distintas para cada aglomerado/grupo da amostra: uma região interna que abrange (quase) todo o núcleo frio (do inglês, *cool-core*), uma região externa projetada para evitar a contaminação proveniente do núcleo frio e uma região correspondente ao campo de visão completo do XIS/*Suzaku*. Aglomerados do tipo *cool-core* são caracterizados por gradientes centrais de abundância de Fe, onde se observa um pico de brilho da superfície e abundância de Fe no centro, enquanto a temperatura, tipicamente, declina para valores aproximadamente $\sim 2 - 3$ vezes abaixo dos registrados nas regiões periféricas. Em contrapartida, aglomerados sem núcleos frios não apresentam o pico de brilho da superfície e queda de temperatura central, como destacado por [14].

A faixa de *redshift* da amostra de aglomerados e grupos de galáxias é determinada considerando a função de espalhamento pontual e o campo de visão do XIS a bordo do satélite *Suzaku*. As regiões internas são círculos com raios de $1'$ a $4'$, escolhidos com base no raio *cool-core* e na minimização da contaminação pela PSF. Os raios são determinados com referência ao projeto ACCEPT [15], exceto para Abell 3571 [16, 17], NGC 6338, NGC 2300 [18], NGC 4472 [19], Grupos NGC 1550 [20] e UGC 3957 [21]. As regiões externas são anéis com raio interno $\geq 5'$ e raio externo $8'$. A escolha de $5'$ reduz a contaminação da vizinhança do núcleo frio.¹ Regiões totais têm um raio de $8'$.

3 Metodologia

Elaboramos uma metodologia não paramétrica para comparar os *yields* preditos por modelos de ex-

¹http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/process/caveats/caveats_xrtxis03.html

plosão de SNe com as razões de abundâncias observadas no meio intra-grupo/aglomerado de nossa amostra. Para detalhes sobre a metodologia, sugerimos a consulta ao trabalho [1]. A abordagem desenvolvida atribui pesos a cada medida de razão de abundância, formando assim uma função de distribuição de probabilidade total. Essa abordagem visa evitar a atenuação ao calcular a média dessas medidas.

3.1 Relação entre abundâncias no ICM e modelos teóricos de explosão de supernovas com yields

Os elementos químicos presentes no ICM/IGrM têm origens distintas em fontes estelares. Supomos que os elementos pesados observados no ICM/IGrM provêm, em última instância, do material expelido por dois tipos de supernovas (SN): SNIa e SNcc, sendo este último representativo de todas as supernovas resultantes do colapso do núcleo estelar. O enriquecimento químico no ICM/IGrM pode, assim, ser quantificado por meio de uma combinação linear de cada tipo de SNe. O número *observado* de átomos no ICM, denotado como $N(E)$ para um determinado elemento E, é expresso como:

$$\underbrace{N(E)}_{\text{observado no ICM}} = \underbrace{n_i N_i^{\text{Ia}}(E) + n_j N_j^{\text{cc}}(E)}_{\text{previsto por modelos de SN}}, \quad (1)$$

onde $N_i^{\text{Ia}}(E)$ e $N_j^{\text{cc}}(E)$ são os números de átomos previstos pelos modelos SNIa i e modelos SNcc j , respectivamente. Aqui, $i = 1, 2, \dots, 232$ refere-se aos 232 modelos de SNIa considerados, e $j = 1, 2, \dots, 31$ indexa os 31 modelos de SNcc. As abundâncias numéricas $A_i^{\text{Ia}}(E)$ e $A_j^{\text{cc}}(E)$ representam o número de átomos de um dado elemento E dividido pelo número de átomos de hidrogênio (H), normalizado para a mesma razão que o valor solar, produzido pelos modelos de SNIa i e pelos modelos de SNcc j , respectivamente. Os coeficientes n_i e n_j indicam o número de SNIa e de SNcc que contribuíram para o enriquecimento do ICM/IGrM, calculados adotando-se os modelos i e j , respectivamente. O argumento E representa o elemento químico considerado, onde $E = \text{O, Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni}$. Daqui em diante, desenvolveremos a notação para os modelos de SNIa i . Entretanto, uma expressão análoga das equações nesta seção pode ser obtida para os modelos de SNcc j .

O número de átomos, N_i^{Ia} , de um dado elemento E,

é definido como:

$$N_i^{\text{Ia}} = N_i^{\text{Ia}}(E) = \frac{Y_i^{\text{Ia}}(E)}{\mu(E)}, \quad (2)$$

onde $Y_i^{\text{Ia}}(E)$ é o *yield* em massa do elemento E (simulado) pelo modelo SNIa i , e $\mu(E)$ é a massa atômica do elemento E.

Enquanto os *yields* Y_i^{Ia} são diretamente extraídos das tabelas de *yields* considerando as conversões de unidades, os *yields* de Supernovas do colapso do núcleo (SNcc) são fornecidos para diferentes massas da estrela progenitora (m) e sua metalicidade inicial, Z_{init} , ou seja, $Y_j^{\text{cc}}(m, E, Z_{\text{init}})$. Utilizamos a Função de Massa Inicial (FMI) de Salpeter [22] com inclinação $\alpha = -2,35$ para ponderar esses *yields* discretos dentro dos limites de massa simulados ($m_{j,\text{low}}$ a $m_{j,\text{up}}$) para uma Z_{init} comum.

A média total de *yields*, $\bar{Y}_j^{\text{cc}}(E, Z_{\text{init}})$, para um elemento E específico, ponderada pela Função de Massa Inicial (do inglês, *Initial Mass Function* ou IMF) de Salpeter dentro do intervalo de $m_{j,\text{low}}$ e $m_{j,\text{up}}$ para uma dada metalicidade inicial da estrela progenitora, Z_{init} , é expressa como:

$$\bar{Y}_j^{\text{cc}} = \bar{Y}_j^{\text{cc}}(E, Z_{\text{init}}) = \frac{\int_{m_{j,\text{low}}}^{m_{j,\text{up}}} Y_j^{\text{cc}}(m, E, Z_{\text{init}}) m^\alpha dm}{\int_{m_{j,\text{low}}}^{m_{j,\text{up}}} m^\alpha dm}, \quad (3)$$

onde $Y_j^{\text{cc}}(m, E, Z_{\text{init}})$ é o *yield* sintetizado pelo modelo de SNcc j por uma estrela progenitora com massa inicial m e metalicidade Z_{init} para o elemento E.

Por definição, a abundância numérica A_i^{Ia} (relativa a H) de um dado elemento E medida no XSPEC tem a relação abaixo:

$$A_i^{\text{Ia}} = A_i^{\text{Ia}}(E) \equiv \frac{[N_i^{\text{Ia}}(E)/N(\text{H})]}{[N(E)/N(\text{H})]_\odot}, \quad (4)$$

onde $N(E)$ e $N(\text{H})$ são o número de átomos dos elementos E e hidrogênio, respectivamente, e $[N(E)/N(\text{H})]_\odot$ representa essa razão para o sol, ou seja, a abundância solar (adotada de [23]).

A razão de abundância elementar individual de um dado elemento E para aquela de Fe, $R(E)$, usando as Equações (1), (2) e (4), pode ser escrita como

$$R(E) = f_i R_i^{\text{Ia}}(E) + f_j R_j^{\text{cc}}(E), \quad (5)$$

onde $R_i^{\text{Ia}} = R_i^{\text{Ia}}(E) \equiv \frac{A_i^{\text{Ia}}(E)}{A_i^{\text{Ia}}(\text{Fe})}$ é a razão de abundância do elemento E prevista pelo modelo de SNIa i . A

fração de massa de ferro f_i resulta do enriquecimento do ICM usando o modelo de SNIa i , expressa como

$$f_i = \frac{n_i N_i^{\text{Ia}}(\text{Fe})}{N(\text{Fe})} \text{ e } f_j = \frac{n_j N_j^{\text{cc}}(\text{Fe})}{N(\text{Fe})}. \quad (6)$$

Tal fração também pode ser expressa em termos dos *yields* e das medidas de abundâncias observadas no ICM como

$$f_i = \frac{Y_i^{\text{Ia}}(\text{Fe}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{Fe}) - Y_i^{\text{Ia}}(\text{Fe}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{E}) \frac{A(\text{Fe})}{A(\text{E})} \frac{\mu(\text{Fe})}{\mu(\text{E})} \left(\frac{N(\text{E})}{N(\text{Fe})} \right)_{\odot}}{\frac{A(\text{Fe})}{A(\text{E})} \frac{\mu(\text{Fe})}{\mu(\text{E})} \left(\frac{N(\text{E})}{N(\text{Fe})} \right)_{\odot} [Y_i^{\text{Ia}}(\text{E}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{Fe}) - Y_i^{\text{Ia}}(\text{Fe}) \bar{Y}_j^{\text{cc}}(\text{E})]}, \quad (7)$$

onde, por definição, $f_i + f_j \equiv 1$. As abundâncias numéricas medidas no ICM para elementos específicos E e Fe são denotadas como $A(\text{E})$ e $A(\text{Fe})$, respectivamente.

Portanto, as razões de abundância observadas do elemento E em relação ao elemento Fe ($R(\text{E})$) revelam uma combinação linear das razões dos *yields* teóricos dos modelos de SNIa e SNcc ($R_i^{\text{Ia}}(\text{E})$ e $R_j^{\text{cc}}(\text{E})$, respectivamente), como mostra a Equação (5). Posteriormente, vamos comparar a distribuição das razões de abundância *teóricas* dos modelos de SNIa e SNcc com a distribuição da razão de abundância *observada*.

4 Comparação não-paramétrica: ranqueando modelos teóricos de explosão de supernova

Utilizamos o teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) para ranquear a semelhança entre duas CDFs, representando a distribuição teórica de *yields* (tCDF, associada ao par de modelos de explosões de SNe) e a distribuição dos dados observados (eCDF, associada às medidas de razões de abundância no ICM). Para isso, utilizamos o estimador de semelhança entre as CDFs, $D_{i,j}(\text{E})$, que calcula a distância máxima entre elas para um par específico (i, j) dos modelos de SNe (i, j), expressa

$$D_{i,j}(\text{E}) = \max |e\text{CDF}(R(\text{E})) - \text{tCDF}(R_i^{\text{Ia}}(\text{E}), R_j^{\text{cc}}(\text{E}))|. \quad (8)$$

Escolhemos um nível de significância pré-estabelecido de $\alpha = 0,05$ como limite para rejeitar a hipótese nula. Quando o valor p (do inglês, *valor de p*) é inferior a esse limite, concluímos que as duas distribuições são significativamente diferentes e rejeitamos a hipótese nula. Implementamos o teste KS de duas amostras, adaptando a rotina `scipy.stats.kstest` da biblioteca SciPy-Python [24].

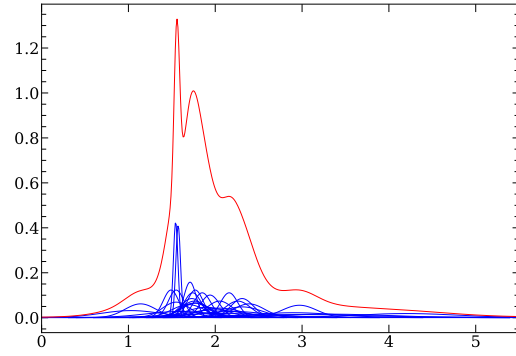


Figura 1: Função de distribuição de probabilidade das medidas da razão de abundância Si/Fe das regiões interna e externa. As linhas azuis indicam a medida de Si/Fe para cada objeto em nossa amostra, representada por distribuições normais cuja média é o valor nominal de Si/Fe e o desvio padrão é o respectivo erro. A linha vermelha é a soma final de cada distribuição normal em nossa amostra.

Função de distribuição cumulativa empírica (eCDF)

A função de distribuição cumulativa empírica (eCDF) é construída a partir das razões de abundância medidas no meio intra-grupo/aglomerado (ICM) de um determinado elemento E ($e\text{CDF}(R(\text{E}))$).

A Figura 1 apresenta as distribuições normais das razões Si/Fe, $R(\text{E})$, para cada aglomerado e grupo de galáxias (linhas azuis) em nossa amostra. A eCDF é construída considerando os valores nominais das razões de abundância observadas e seus erros associados. O procedimento é exemplificado usando a razão de abundância Si/Fe. Cada medida de Si/Fe é modelada como uma distribuição normal centrada no valor nominal da razão de abundância, com um desvio padrão igual ao erro associado. A função de distribuição de probabilidade total de Si/Fe (linha vermelha) é obtida pela soma e normalização das distribuições normais individuais. A eCDF correspondente de Si/Fe (linha sólida verde na Figura 2) é calculada usando a distribuição de probabilidade total. Este procedimento é repetido para cada uma das oito razões de abundância consideradas neste trabalho.

Função de distribuição cumulativa teórica (tCDF)

A função de distribuição cumulativa teórica (tCDF) é construída para cada par de modelos de SNe, composto por um modelo de Supernova Tipo Ia (SNIa) e um modelo de Supernova por colapso

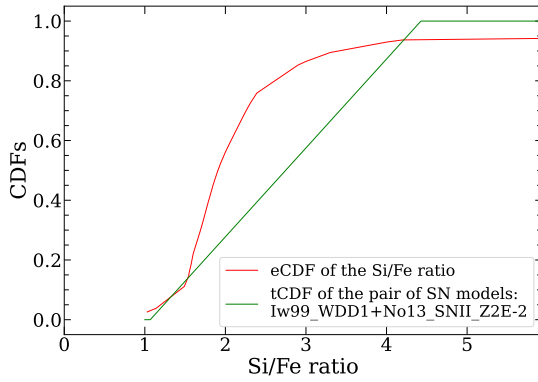


Figura 2: Comparação entre a função de distribuição cumulativa empírica (eCDF) e a função de distribuição cumulativa teórica (tCDF) para o par SN composto por Iw99_WDD1 (SNIa, $R(\text{Si})_{\text{WDD1}}^{\text{Ia}} = 1,067$) e No13_SNI_ZZE-2 (SNcc, $R(\text{Si})_{\text{SNIIZZE-2}}^{\text{cc}} = 4,43$). A linha vermelha sólida representa a eCDF da razão de abundância Si/Fe dos grupos e aglomerados de galáxias de nossa amostra. A linha verde sólida indica o tCDF construído a partir do par de modelos de SNe Iw99_WDD1 e No13_SNI_ZZE-2 (ver texto).

do núcleo (SNcc) associada às razões de abundância teóricas de um par de modelos de Supernovas (SNe), $R_i^{\text{Ia}}(E)$ e $R_j^{\text{cc}}(E)$, compostos por um modelo SNIa i e um modelo SNcc j ($\text{tCDF}(R_i^{\text{Ia}}(E), R_j^{\text{cc}}(E))$). A tCDF é construída considerando essas razões como limites da função de distribuição de probabilidade (PDF) e assumindo que, entre esses limites, cada valor tem a mesma probabilidade, ou seja, uma PDF plana.

Para um enriquecimento total devido apenas a SNIa no meio intra-grupo/aglomerado (ICM), a razão de abundância seria $R_i^{\text{Ia}}(E)$. No extremo oposto, com todo o enriquecimento proveniente de SNcc, a razão seria $R_j^{\text{cc}}(E)$. Além disso, (i) qualquer medida intermediária $R_i^{\text{Ia}}(E) < R(\text{Si}) < R_j^{\text{cc}}(E)$ resulta de uma combinação linear de ambos os tipos de SN e (ii) este par de modelos de SN explica a razão de abundância observada entre esses limites. A probabilidade de medir $R(\text{Si})$ fora desse intervalo é 0. Em termos da função de distribuição cumulativa ($\text{tCDF}(x) = P[\text{Si}/\text{Fe} \leq x]$), isso pode ser expresso como:

$$\text{tCDF}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < R_i^{\text{Ia}}(E), \\ \frac{x - R_i^{\text{Ia}}(E)}{R_j^{\text{cc}}(E) - R_i^{\text{Ia}}(E)} & \text{se } \begin{cases} R_i^{\text{Ia}}(E) \leq x \\ x < R_j^{\text{cc}}(E) \end{cases} \\ 1 & \text{se } x \geq R_j^{\text{cc}}(E). \end{cases} \quad (9)$$

Tabela 1: *Yields* dos modelos teóricos de SN em unidades solar.

Razões de Abundância	No06_SNI_ZZE-2 (SNcc)	Oh14_DD_40 (SNIa)
O/Fe	3,04	0,013
Ne/Fe	5,17	0,002
Mg/Fe	4,24	0,03
Si/Fe	3,54	0,78
S/Fe	2,82	0,70
Ar/Fe	1,71	0,45
Ca/Fe	2,05	0,60
Ni/Fe	1,16	2,12

5 Resultados e discussão

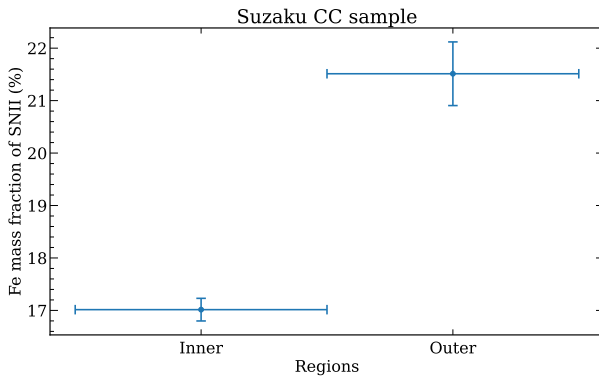
Considerando duas classes de Supernovas (SNe): SNcc e SNIa, calculamos a fração de massa de Fe de SNII para várias regiões interna e externa do IGrM/ICM. Utilizamos a combinação do modelo Oh14_DD_40 de detonação retardada 3D [12] (SNIa) e o modelo No06_SNI_ZZE-2 de Supernova Tipo II com metalicidade inicial de 0,02 [13] (SNII), pesada na IMF de Salpeter na faixa de massa de 13-40 M_{\odot} , conforme apresentado em [1]. A Tabela 1 apresenta os *yields* para esses modelos.

No trabalho de [1], avaliamos a compatibilidade entre razões de abundância previstas por 7192 pares de modelos de supernovas (SN) e observações no meio intra-grupo/aglomerado (ICM/IGM) para oito razões de abundância em 18 aglomerados e grupos de galáxias. Aplicamos o teste Kolmogorov-Smirnov (KS) para cada par de modelos SN, rejeitando a hipótese nula quando o valor de p é menor que 0,05 (2σ).

Calculamos a fração média percentual de massa de Fe para as regiões interna e externa, utilizando as razões de abundâncias observadas pelo satélite Suzaku e os modelos de SNe mencionados (ver Tabela 2). Valores percentuais não-físicos foram excluídos da média, representando aqueles fora da faixa de 0–100%. A Figura 3 mostra a média ponderada das frações médias percentuais de massa de Fe de todas as razões E/Fe, exceto O/Fe. Essa média revela que a região interna tem uma fração percentual de massa de Fe proveniente de SNII menor do que na região externa, onde esse valor cresce de $17,0 \pm 0,2$ para $21,3 \pm 0,6$.

Tabela 2: Fração percentual da massa de Fe de SNII em valores percentuais para a amostra de aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios.²

Região	O/Fe (%)	Ne/Fe (%)	Mg/Fe (%)	Si/Fe (%)	S/Fe (%)	Ar/Fe (%)	Ca/Fe (%)	Ni/Fe (%)
Interna	2,0±0,3	43,3±0,7	33,3±0,6	31,2±0,6	37,0±0,9	100±4	69±4	58±4
Externa	3,6±0,8	32,4±1,7	51,8±1,7	38,0±1,6	40,3±2,6	> 100 ³	78±9	< 0 ⁴

**Figura 3:** Fração percentual de massa de Fe de SNII das medidas do Suzaku de aglomerados e grupos com núcleos frios, baseada na combinação dos modelos Oh14_DD_40 [12] e modelo No06_SNII_Z2E-2 [13].

A Tabela 2 apresenta a fração percentual de massa de Fe de SNII para diferentes razões de abundância na amostra de aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios. Valores acima de 100% ou abaixo de 0% não são físicos, portanto, apenas os limites inferiores ou superiores são apresentados. A Figura 3 ilustra esses resultados, destacando a importância das diferentes razões de abundância na determinação da fração de massa de Fe de SNII.

É importante observar que a região interna apresenta uma medida discrepante para a razão O/Fe em Abell 3526 (também conhecido como aglomerado de Centauro), resultando em uma fração percentual de massa de Fe de SNII de $2,2 \pm 0,3$. Desconsiderando essa medida, a média ponderada da fração de massa de Fe de SNII aumenta para $0,79 \pm 0,03$ solar. Essa discrepância em Centauros pode ser atribuída à com-

plexidade de seu núcleo, incluindo bolhas e subestruturas. A região englobada com o Suzaku é dominada pela região central do aglomerado, e Centauros possui um núcleo bem complexo, com bolhas e subestruturas, incluída pela nossa região interna nos seus $3'$ (~ 45 kpc) centrais [25]. Por outro lado, nossa medida mais baixa de O, $0,011 \pm 0,007$ solar, pode ter sido afetada devido à simplicidade de modelos (1T) que usamos para ajustar essa zona central complexa, ainda pelo fato de fixarmos o valor da densidade de coluna de hidrogênio durante o ajuste espectral. Medidas mais detalhadas e modelos mais refinados podem esclarecer essa disparidade.

A delimitação das regiões internas maximiza o excesso de abundância de ferro medida, pois se baseia na região espacial do núcleo frio. O pico de abundância de Fe no centro dos sistemas de galáxias do tipo *cool-core* pode derivar de um prolongado período de enriquecimento por explosões SNIa, cujos produtos são depositados na galáxia mais brilhante em aglomerados [26, 27]. Estudos iniciais apontavam uma contribuição relativamente maior da fração de massa de Fe proveniente do material ejetado de SNIa nas regiões centrais de aglomerados do tipo *cool-core*, em comparação com as regiões externas [16, 28]. Essa tendência não se revelou uma característica universal, carecendo de confirmação sistemática em todas as medições das razões de abundâncias [29–32]. Contudo, encontramos a existência do gradiente radial na fração de massa de Fe proveniente de SNIa nas regiões centrais de aglomerados do tipo *cool-core*. Este resultado apoia a hipótese de que a Pressão de Arrasto desempenha um papel significativo no transporte de metais dentro desses sistemas. A pressão de arrasto é mais eficiente no centro devido à mais alta densidade do ICM/IGrM do que nas regiões periféricas, produzindo uma distribuição de metais concentrada nas regiões centrais. Sobretudo para aglomerados massivos, onde essa característica foi mostrada

²Os valores acima de 100% e abaixo de 0% não são físicos, logo apresentamos apenas os limites inferiores ou superiores. Para informação do leitor os erros fracionários percentuais também estão indicados neste rodapé.

³Erro fracionário de 9%.

⁴Erro fracionário de 9%.

em simulações numéricas de N-corpos [33]. Nossos resultados (e todo resultado quantitativo em relação ao enriquecimento químico) são sensíveis à escolha dos modelos de explosão de supernovas. Para minimizar esta incerteza, consideramos os melhores modelos teóricos para reproduzir o padrão observado no ICM/IGrM [1].

Ventos galácticos impulsionados por supernovas (do inglês, *SN-driven galactic winds*) já foram sugeridos como um possível mecanismo de transferência de metais do meio intergalático para o ICM. Esse mecanismo parece desempenhar um papel importante tanto na reprodução dos valores observados de metais no ICM quanto no aquecimento do ICM próximo às regiões centrais de grupos de galáxias [8]. Em escalas maiores de aglomerados, esse mecanismo também pode ser relevante no enriquecimento químico do ICM. Estimativas baseadas nas metalicidades do ICM sugerem que esse mecanismo é uma importante fonte de material rico em metais, enriquecendo o ICM com ejeções de SNII, abundantes em elementos *alpha* [34].

6 Conclusão

Neste estudo, calculamos a fração de massa de ferro das razões de abundância nas regiões centrais de dezoito aglomerados e grupos de galáxias com núcleos frios, considerando a contribuição de SNII e SNIa. A escolha do par de modelos de SN afeta o valor dessa fração. Para reduzir esta incerteza, utilizamos modelos teóricos de detonação retardada 3D de [12] para Supernovas do Tipo Ia (SNIa) e o modelo de SNII com metalicidade inicial de 0,02 da estrela progenitora de [13], um dos pares de modelos mais bem avaliados dentre o conjunto de mais de sete mil combinações [1]. Com isso, nossa abordagem, utilizando os modelos mais bem avaliados, proporcionou uma avaliação robusta da fração percentual de massa de Fe proveniente de SNII/SNIa, revelando padrões distintos no enriquecimento químico da amostra para regiões centrais e externas.

Os resultados destacam variações significativas na fração de massa de Fe proveniente de SNII entre as regiões interna e externa dos aglomerados e grupos estudados. Observamos uma diminuição da contribuição de SNII/SNIa na região interna, indicando que os processos envolvidos no enriquecimento químico nessa área mais centralizada podem ter uma contri-

buição significativa da galáxia dominante no centro desses sistemas através da pressão de arrasto. Esse resultado favorece o cenário em que a pressão de arrasto é um dos mecanismos relevantes no transporte de metais nesses sistemas.

Além disso, a medida discrepante em Centauros ressalta a complexidade desses sistemas e destaca a necessidade de investigações mais aprofundadas. A discrepância na razão O/Fe em Centauros aponta para desafios na modelagem das regiões centrais complexas, indicando a importância de técnicas de modelagem mais refinadas para uma compreensão abrangente desses ambientes. Observações desse tipo de objeto com os observatórios de ponta, como Athena [35] e XRISM [36], proporcionarão caracterização dinâmica e química sem precedentes. As nuances identificadas na distribuição do Fe incentivam futuras investigações a aprimorar ainda mais nossos modelos e abordagens analíticas, promovendo uma compreensão mais completa dos processos que regem o enriquecimento químico do meio intra-grupo e intra-aglomerado.

Agradecimentos

Agradecemos aos pareceristas pelos comentários extremamente úteis, que nos permitiram melhorar este artigo. Este trabalho utiliza observações arquivadas do satélite *Suzaku*. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. R.M.B. acknowledges support by Centre National d’Études Spatiales (CNES) under the EPICSSC project for XMM-Newton.

Sobre as autoras

Rebeca M. Batalha (rbatalha.astro@gmail.com) é graduada em Física pela UFRRJ (2016) e mestre e doutora em Astronomia pelo Observatório Nacional (2018 e 2022). Atualmente, ela é pesquisadora pós-doutoral no Département d’Astrophysique no instituto CEA Paris-Saclay, França. Sua pesquisa se concentra na astrofísica de altas energias de aglomerados de galáxias, dedicando-se à investigação do enriquecimento químico desses objetos através dos dados dos observatórios espaciais de raios-X do meio intra-aglomerado (ICM). Ela faz parte da colaboração do

CHEXMATE (Cluster HERitage project with XMM-Newton: Mass Assembly and Thermodynamics at the Endpoint of structure formation), que busca obter observações XMM-Newton homogêneas de uma amostra representativa de 118 aglomerados de galáxias para reconstruir a distribuição das principais grandezas termodinâmicas do ICM. Além disso, ela participa do levantamento J-PAS, atuando na seleção bayesiana de grupos fósseis no grupo de aglomerados e lentes. Seu trabalho atual em astrofísica extragaláctica enfatiza estruturas em larga escala, aglomerados e grupos de galáxias, grupos fósseis, enriquecimento de metais e modelos de explosão de supernovas.

Yolanda Jiménez-Teja graduou-se em Matemática pela Universidad de Cádiz (2003) e obteve seu doutorado em Física y Matemáticas pela Universidad de Granada (2011). Atualmente, ela é pesquisadora pós-doutoral no Instituto de Astrofísica de Andaluzia em Granada, Espanha, onde recebeu uma prestigiosa bolsa Marie Curie. Dedicou-se à astrofísica, com foco particular no estudo da luz intra-aglomerado (ICL) e na dinâmica dos aglomerados de galáxias. Jiménez-Teja contribuiu para várias publicações importantes, incluindo estudos sobre lentes gravitacionais e propriedades de galáxias e aglomerados distantes. Ela tem um histórico notável de pesquisa e colaboração em importantes projetos de astronomia observacional, como a pesquisa de lentes gravitacionais e supernovas com o Hubble (CLASH). Seu trabalho é significativamente relevante para a compreensão das propriedades dos aglomerados de galáxias e a estrutura em larga escala do universo.

Sobre o autor

Renato de Alencar Dupke é formado em Astronomia pela Universidade Estatal de Moscou M. V. Lomonossov (1990), possui mestrado em Física e Matemática pela mesma universidade (1993) e doutorado em Astrofísica pela University of Alabama (1998). Atualmente, ele é astrônomo e pesquisador titular afiliado ao Observatório Nacional no Rio de Janeiro, Brasil, e atua também como pesquisador assistente visitante na Universidade de Michigan e na Universidade do Alabama, nos Estados Unidos. Sua pesquisa foca em astrofísica de altas energias, especialmente nas origens e evolução de aglomerados e grupos de galáxias. Ele é diretor científico da colaboração e investigador principal do levantamento J-PAS (Java-

lambre Physics of the Accelerating Universe Survey) no Brasil (PAU-BRASIL), um levantamento terrestre destinado a coletar dados espectro-fotométricos de milhões de galáxias para entender melhor a energia escura e a estrutura do universo. Seu trabalho atual na área de astrofísica extragaláctica enfatiza estruturas em larga escala, aglomerados e grupos de galáxias, grupos fósseis, enriquecimento de metais, dinâmica do meio intra-aglomerado, luz intra-aglomerado e modelos de explosão de supernovas.

Referências

- [1] R. M. Batalha, R. A. Dupke e Y. Jiménez-Teja, *Ranking Theoretical Supernovae Explosion Models from Observations of the Intracluster Gas*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **262**(1), 27 (2022). [ArXiv:2207.00601](#).
- [2] K. Maeda e Y. Terada, *Progenitors of type Ia supernovae*, *International Journal of Modern Physics D* **25**, 1630024 (2016). [ArXiv:1609.03639](#).
- [3] I. R. Seitenzahl e D. M. Townsley, *Nucleosynthesis in Thermonuclear Supernovae* (2017), 1955.
- [4] M. Livio e P. Mazzali, *On the progenitors of Type Ia supernovae*, *Physics Reports* **736**, 1 (2018). [ArXiv:1802.03125](#).
- [5] K. Nomoto, C. Kobayashi e N. Tominaga, *Nucleosynthesis in Stars and the Chemical Enrichment of Galaxies*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **51**(1), 457 (2013).
- [6] S. Schindler e A. Diaferio, *Metal Enrichment Processes*, *Space Science Reviews* **134**(1-4), 363 (2008). [ArXiv:0801.1061](#).
- [7] F. Mernier et al., *Enrichment of the Hot Intracluster Medium: Observations*, *Space Science Reviews* **214**(8), 129 (2018). [ArXiv:1811.01967](#).
- [8] R. B. Larson e H. L. Dinerstein, *Gas loss in groups of galaxies*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **87**, 911 (1975).

- [9] J. E. Gunn e J. R. Gott, III, *On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution*, *The Astrophysical Journal* **176**, 1 (1972).
- [10] V. Biffi, F. Mernier e P. Medvedev, *Enrichment of the Hot Intracluster Medium: Numerical Simulations*, *Space Science Reviews* **214**(8), 123 (2018). [ArXiv:1811.01955](#).
- [11] K. Maeda e Y. Terada, *Progenitors of type Ia supernovae*, *International Journal of Modern Physics D* **25**(10), 1630024 (2016). [ArXiv:1609.03639](#).
- [12] S. T. Ohlmann et al., *The white dwarf's carbon fraction as a secondary parameter of Type Ia supernovae*, *Astronomy & Astrophysics* **572**, A57 (2014). [ArXiv:1409.2866](#).
- [13] K. Nomoto et al., *Nucleosynthesis yields of core-collapse supernovae and hypernovae, and galactic chemical evolution*, *Nuclear Physics A* **777**, 424 (2006). [ArXiv:astro-ph/0605725](#).
- [14] S. De Grandi e S. Molendi, *Metallicity Gradients in X-Ray Clusters of Galaxies*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **551**(1), 153 (2001). [ArXiv:astro-ph/0012232](#).
- [15] K. W. Cavagnolo et al., *Intracluster Medium Entropy Profiles for a Chandra Archival Sample of Galaxy Clusters*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **182**(1), 12 (2009). [ArXiv:0902.1802](#).
- [16] R. A. Dupke e I. White, Raymond E., *Constraints on Type IA Supernova Models from X-Ray Spectra of Galaxy Clusters*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **528**(1), 139 (2000). [ArXiv:astro-ph/9907343](#).
- [17] D. Eckert, S. Molendi e S. Paltani, *The cool-core bias in X-ray galaxy cluster samples. I. Method and application to HIFLUGCS*, *Astronomy & Astrophysics* **526**, A79 (2011). [ArXiv:1011.3302](#).
- [18] J. Rasmussen e T. J. Ponman, *Temperature and abundance profiles of hot gas in galaxy groups – I. Results and statistical analysis*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **380**(4), 1554 (2007).
- [19] R. P. Kraft et al., *The gas dynamics of NGC 4472 revealed by XMM-Newton*, *The Astrophysical Journal* **727**(1), 41 (2010).
- [20] K. Kolokythas et al., *Evidence of AGN feedback and sloshing in the X-ray luminous NGC 1550 galaxy group*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **496**(2), 1471 (2020). [ArXiv:2005.12950](#).
- [21] S. Thölken et al., *X-ray analysis of the galaxy group UGC 03957 beyond R_{200} with Suzaku*, *Astronomy & Astrophysics* **592**, A37 (2016). [ArXiv:1603.05255](#).
- [22] E. E. Salpeter, *The Luminosity Function and Stellar Evolution.*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **121**, 161 (1955).
- [23] E. Anders e N. Grevesse, *Abundances of the elements: Meteoritic and solar*, *Geochimica Cosmochimica Acta* **53**(1), 197 (1989).
- [24] P. Virtanen et al., *SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python*, *Nature Methods* **17**, 261 (2020).
- [25] J. S. Sanders et al., *A very deep Chandra view of metals, sloshing and feedback in the Centaurus cluster of galaxies*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **457**(1), 82 (2016). [ArXiv:1601.01489](#).
- [26] S. De Grandi et al., *On the iron content in rich nearby clusters of galaxies*, *Astronomy & Astrophysics* **419**, 7 (2004). [ArXiv:astro-ph/0310828](#).
- [27] H. Böhringer et al., *Implications of the central metal abundance peak in cooling core clusters of galaxies*, *Astronomy & Astrophysics* **416**, L21 (2004). [ArXiv:astro-ph/0402216](#).
- [28] A. Finoguenov, L. P. David e T. J. Ponman, *An ASCA Study of the Heavy-Element Distribution in Clusters of Galaxies*, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* **544**(1), 188 (2000). [ArXiv:astro-ph/9908150](#).
- [29] J. de Plaa et al., *Chemical evolution in Sérsic 159-03 observed with XMM-Newton*, *Astronomy & Astrophysics* **452**(2), 397 (2006). [ArXiv:astro-ph/0602582](#).

- [30] A. Simionescu et al., *Chemical enrichment in the cluster of galaxies Hydra A*, *Astronomy & Astrophysics* **493**(2), 409 (2009). [ArXiv:0809.2613](#).
- [31] H. Böhringer e N. Werner, *X-ray spectroscopy of galaxy clusters: studying astrophysical processes in the largest celestial laboratories*, *Astronomy & Astrophysics Reviews* **18**(1-2), 127 (2010).
- [32] F. Mernier et al., *Radial metal abundance profiles in the intra-cluster medium of cool-core galaxy clusters, groups, and ellipticals*, *Astronomy & Astrophysics* **603**, A80 (2017). [ArXiv:1703.01183](#).
- [33] S. Schindler et al., *Metal enrichment processes in the intra-cluster medium*, *Astronomy & Astrophysics* **435**(2), L25 (2005). [ArXiv:astro-ph/0504068](#).
- [34] V. Baumgartner e D. Breitschwerdt, *Metal enrichment of the intracluster medium: SN-driven galactic winds*, *Astronomische Nachrichten* **330**, 898 (2009). [ArXiv:0908.1309](#).
- [35] E. Cucchetti et al., *Athena X-IFU synthetic observations of galaxy clusters to probe the chemical enrichment of the Universe*, *Astronomy & Astrophysics* **620**, A173 (2018). [ArXiv:1809.08903](#).
- [36] XRISM Science Team, *Science with the X-ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM)* (2020). [ArXiv:2003.04962](#).

Fotoquímica de Hidrocarbonetos Policíclicos em gelos de água cósmica

Ana L. F. de Barros

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

Resumo

Este trabalho engloba o estudo da fotoquímica de moléculas que possuem um grande número de carbonos e hidrogênios (C_nH_m), conhecidas como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH). Apresentaremos os resultados obtidos irradiando com ultravioleta (UV), em misturas de gelos, a baixas temperaturas, da ordem de 15K, da molécula de coronene ($C_{24}H_{12}$) com água (H_2O), em diferentes concentrações de Cor: H_2O de (1:50), (1:150), (1:200), (1:300) e (1:400), utilizando a técnica de espectroscopia de Transformada de Fourier de Infravermelho (FTIR). Verificamos que os PAHs e seus fotoprodutos em água, PAH: H_2O , induzidos por irradiação UV, têm assinaturas espectroscópicas de infravermelho médio na região de 5–8 μm contribuindo para os componentes do gelo interestelar descritos como C1–C5. Nossos resultados sugerem que PAHs oxigenados e hidrogenados ricos em água podem estar em regiões do meio interestelar importantes.

Abstract

This work encompasses the study of the photochemistry of molecules that have a large number of carbons and hydrogens (C_nH_m), known as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). We will present the results obtained by irradiating with ultraviolet (UV), ice mixtures, at low temperatures, of the order of 15K, of the coronene molecule ($C_{24}H_{12}$) with water (H_2O), in different concentrations of Cor: H_2O of (1:50), (1:150), (1:200), (1:300) and (1:400), using the technique Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy. We find that PAHs and their photoproducts in water, PAH: H_2O , induced by UV irradiation, have mid-infrared spectroscopic signatures in the 5–8 μm region contributing to the interstellar ice components described as C1–C5. Our results suggest that water-rich oxygenated and hydrogenated PAHs may be in important regions of the interstellar medium.

Palavras-chave: astrofísica, química, meio interestelar

Keywords: astrophysics, chemistry, interstellar medium

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44963](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44963)

1 Introdução

Os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs) são um conjunto de moléculas contendo carbono mais abundantes no espaço interestelar médio (ISM). Além disso, evidências diretas e implícitas para a sua existência no sistema solar foi relatado em núcleos de cometas, satélites gelados e anéis planetários externos [1]. Muitos espectros observados, mostram que a emissão de infravermelho (IR) das moléculas de PAH é encontrada em todas as fases do ISM, na nossa e em outras galáxias [2]. A onipresença dos recursos de emissão de PAH no IR, em tão diversos ambientes, implica na existência das mesmas moléculas em nuvens densas. Nessas nuvens densas, as moléculas de PAH podem condensar na fase sólida ou serem incorporadas em mantos formados por grãos de gelo como “moléculas hóspedes”,

como é o caso de outras moléculas interestelares [2]. As bandas moleculares de PAHs em nuvens densas seriam detectados por suas características de absorção, como é o caso de outros mantos de gelo. De fato, para os modos de alongamento C-H aromáticos, cerca de 3,25 μm foram detectados, em absorção de infravermelho, para várias linhas de visão [2]. Além disso, acredita-se que os PAHs contribuem para os recursos de absorção combinados no 5-8 μm região no espectro de objetos estelares jovens [1, 3].

[4] foram os primeiros a identificar provisoriamente fotoprodutos de coronene contendo oxigênio em experimentos de coronene:água em um estudo de infravermelho médio (MIR) (4000–600 cm^{-1}). Eles seguiram a da fotoquímica de moléculas complexas, como coronene:água isolados em uma matriz de argônio utilizando espectroscopia FTIR mostrou

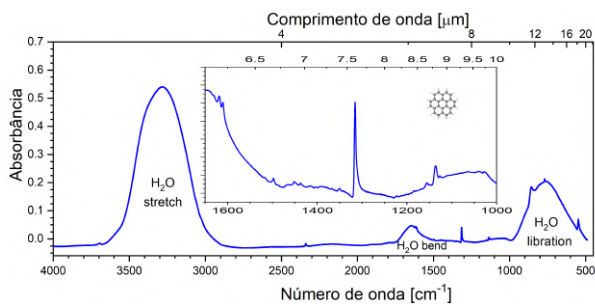


Figura 1: Espectros de absorção FTIR não irradiados ($4000 - 450 \text{ cm}^{-1}$) de Cor:H₂O (1:50) a 15 K. A inserção na figura mostra um zoom do espectro na faixa de $1650 - 1000 \text{ cm}^{-1}$. Os modos atribuídos à água são rotulados no espectro como OH *stretch*, *libration* e *bend* [3]

que coronene reage com a água e, após a irradiação, produz fotoprodutos coronene oxigenados (vide um exemplo de espectro de absorção não irradiado em Fig. 1). Recentemente, estudos espectroscópicos UV-Visível de coronene em gelo de água por [1] mostraram que a eficiência de ionização do coronene é dependente da concentração. As eficiências de ionização são superiores a 60% em baixa concentração de coronene (Cor:H₂O (1:10.000)), caindo para cerca de 15% em concentração coronene (Cor:H₂O(1:1000)), resultados estes comprovados nesse trabalho. Neste trabalho, estendemos os estudos MIR ($6500-450 \text{ cm}^{-1}$) de coronene irradiado por UV (C₂₄H₁₂) em misturas de água (H₂O) congeladas a 15 K seguindo a mesma abordagem dos trabalhos de [1] e [5]. Caracterizamos o efeito de concentração de PAH nas forças da banda, acompanhando a evolução das bandas de infravermelho dos fotoprodutos identificados em função da tempo de irradiação, bem como a taxa de degradação da molécula de coronene. Finalmente, discutimos a possível contribuição da PAH e fotoprodutos aos espectros de nuvens densas.

2 Procedimento experimental

As técnicas de irradiação UV usadas neste estudo foram bem descrito nos trabalhos [1]. As misturas de gelos foram preparados por co-deposição de vapor de coronene com H₂O em uma janela de CsI resfriada a 15 K e suspensa em alto vácuo câmara ($P \sim 10^{-8} \text{ Torr}$). O vapor da amostra de coronene (C₂₄H₁₂), de alta pureza (Aldrich, 99%), foi admitida através de um tubo adjacente para deposição na janela CsI. Para preparar as diferentes concentrações

de água, a temperatura de deposição da coronene foi mantida constante, em torno de 186°C , variando o fluxo de vapor de água. A mistura C₂₄H₁₂:H₂O depositada foi irradiada por UV fótons usando uma lâmpada de descarga de micro-ondas de H₂ fluindo com gás H₂ a uma pressão dinâmica de 150 mTorr. O espectro de tal lâmpada inclui o Lyman combinado de $121,6 \text{ nm}$ ($10,6 \text{ eV}$) e bandas de emissão de hidrogênio molecular de 160 nm ($7,8 \text{ eV}$). A radiação VUV da lâmpada entra na câmara de amostra através de uma janela MgF₂. Os espectros FTIR de 6500 a 450 cm^{-1} foram medidos com um espectrômetro Biorad Excalibur FTS 4000 FTIR equipado com um divisor de feixe KBr e um detector MCT refrigerado a N₂ líquido. Os espectros fotolisados com luz VUV foram coletados após 2, 4, 8, 16, 32 e 60 minutos de irradiação. Os espectros de infravermelho médio foram obtidos após cada evento de fotólise e comparado com o não fotolisado espectro para identificar alterações. A Fig. 2 mostra o espectro não irradiado a mistura com a mínima quantidade de água na amostra: Cor:H₂O=1:50.

3 Resultados e discussões

3.1 Decaimento das moléculas precursoras: coronene e água

Os experimentos de fotólise da razão Cor:H₂O foram realizados para um proporções Cor:H₂O de 1:50, 1:150, 1:200, 1:300 e 1:400. Integrado as áreas das bandas de coronene neutras, ou seja, nos números de onda: $858,1$, $1137,3$, $1317,3$ e $1603,0 \text{ cm}^{-1}$, Fig. 2, verifica-se que a perda da coronene é muito mais eficiente em concentrações mais baixas de molécula. Na concentração mais alta de coronene (Cor:H₂O:1:50) apenas cerca de 20% do coronene neutro é esgotado a 30 minutos, enquanto que em concentrações mais baixas (Cor:H₂O=1:400), quase 60% do coronene neutro se foi pelo mesmo tempo de fotólise.

[5] e [6] propuseram que os processos para o decaimento do PAH podem ser regidos pela recombinação com elétrons aprisionados, um processo que será dependente da temperatura.

3.2 Formação dos fotoprodutos

Para caracterizar os fotoprodutos produzidos em nosso experimentos, calculamos teoricamente os es-

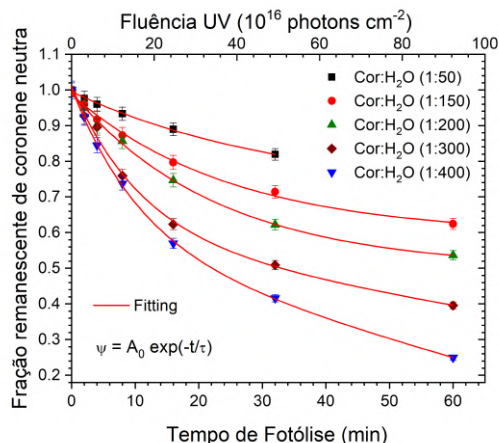


Figura 2: Decaimento neutro da coronene em função do tempo de fotólise (fluência VUV) em concentrações (Cor:H₂O) em (1:50), (1:100), (1:200), (1:300) e (1:400) a 15 K. Erros conservadores são $\pm 3\%$, respectivamente, do valor inicial do depósito espécies neutras. Ajusta-se aos dados com base na soma de uma exponencial decrescente.

pectros de infravermelho de todos os isômeros possíveis de hidroxil, keto e coroneno protonado, e os espectros do coronene cátion e o ânion. Os melhores ajustes entre os nossos espectros computados e os experimentais foram obtidos para as moléculas mostradas na Fig. 3.

Desta forma, foi possível derivar a primeira ordem estimativa da fração de coroneno neutro que é convertida em espécies de fotoprodutos, que foram tratados individualmente.

Na concentração Cor:H₂O (1:400) à 60 minutos de tempo de fotólise, estimamos que $\sim 86\%$ da coronene neutra seja convertida em fotoprodutos (ver Figura 3). Dessa fração de 86% neutros, cerca de 38% é convertida em cátions, 7% é convertido em coronene protonado, 16% em 1,7-diidroxicoronene, 13% para 1,6-diidroxicoronene, 1,2% ito 1,7-coroquinona, cerca de 1% a 1,6-coroquinona, e $\sim 11\%$ em outras espécies como CO₂, CO e H₂CO (não mostrado na Fig. 3).

4 Implicações astrofísicas

Comparando as bandas de fotoprodutos PAH com os componentes interestelares residuais, a Fig. 4 suporta a sugestão de que os PAHs e seus fotoprodutos presos em gelos interestelares devem ser considerados como possíveis contribuintes para os componentes descritas por [2]. A discussão da Fig. 4 é semelhante àquela dada em [1]. Ao longo desta discussão,

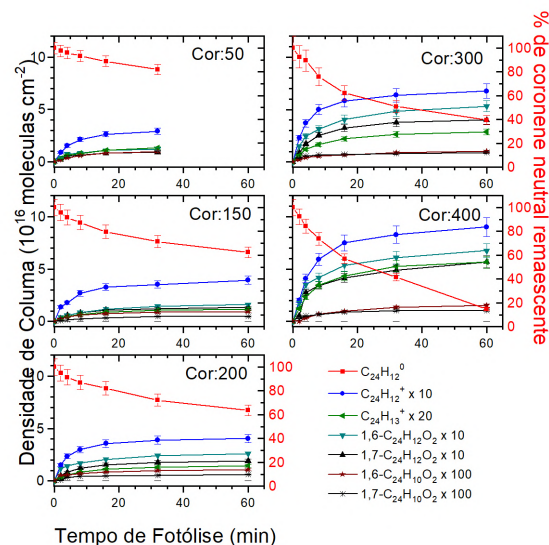


Figura 3: Evolução de C₂₄H₁₂⁰, C₂₄H₁₂⁺, C₂₄H₁₃⁺, 1,6- e 1,7-C₂₄H₁₂O₂ e 1,6-, 1,7-C₂₄H₁₀O₂ produtos fotográficos para todos os Cor:H₂O gelo concentrações a 15 K em função do tempo de fotólise. O erro relativo das bandas foi estimado em $\pm 3\%$ do quantidade depositada de coronene neutro e, assim, a forma da curva de dependência do tempo está bem definida.

tenha em mente a resolução espectral de *Spitzer's*, juntamente com a banda alargamento e mistura inerentes a uma mistura de PAHs e seus fotoprodutos presos em gelos ricos em água produziram muito feições amplas e ligeiramente estruturadas.

A região de 5,5 a 6,5 μm do espectro residual de W33A é dominado pelos componentes C1, C2 e a seção mais forte de C5. Como mencionado anteriormente, bandas entre aproximadamente 5,8 e 5,3 μm caem na região característica do carbonil muito forte ($>\text{C}=\text{O}$), com C1 razoavelmente bem representado e sobrepondo $>\text{C}=\text{O}$ estendendo bandas de gelo HCOOH e H₂CO ([2]). O alongamento $>\text{C}=\text{O}$ esta situado entre aproximadamente 5,5 e 6,25 μm (1740 e 1600 cm^{-1}) para essas espécies e, como acontece com a maioria das carbonilas, o $>\text{C}=\text{O}$ elásticos de alongamento são de longe os mais fortes. Assim, a sugestão de que um mistura de cetonas aromáticas e quinonas contribuem para o porção dominante de 5,5 a 6,5 μm do componente C5 parece ser razoável.

Pode ser observado na Figura 4, que as cetonas (R-C=O) dominam a região entre 5,8 a 6,2 μm correspondendo aos componentes C1 e C2. Os cátions (R⁺ e R-H⁺) são mais abundantes na parte de C2, C3 e C4 (6,2 a 7 μm) e os álcoois (R-OH) dominam o C2 (6 a 6,2 μm). Uma leitura mais aprofundada da Figura 4 mostra que a componente do C2, que se es-

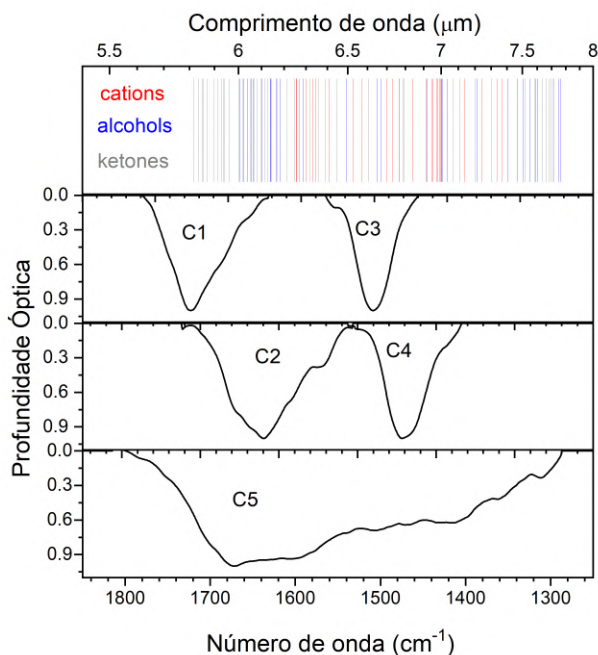


Figura 4: Painel superior: posições de banda computadas DFT para o cátion (R^+ , $R-H^+$), álcool ($R-OH$) e cetona ($R-C=O$) formas de os PAHs aqui considerados, a saber: R = antraceno, R = pireno, R = benzo[ghi]perileno, e R = coroneno. Bandas com previsão forças superiores a $\sim 30 \text{ km mol}^{-1}$ são mostradas. Mais baixo Painéis: Os componentes C1 a C5 associados a gelos em ambientes densos nuvens e regiões formadoras de estrelas descritas por [2].

tende de cerca de 5,8 a 6,5 μm , corresponde para a região com maior densidade de bandas de fotoprodutos de PAH. Essas bandas se originam principalmente no trecho CC aromático do PAH em todos esses diferentes PAHs. Como essa densidade de bandas é produzida por apenas quatro PAHs e seus fotoprodutos enquanto gelos interestelares provavelmente contém muito mais PAHs, é razoável atribuir o sobreposto da componente C2 a estas bandas. Para maiores detalhes sobre detalhamento das bandas e contexto da hipótese/modelo dos PAHs pode ser encontrado em [1].

5 Conclusões

Foram verificados como fotoprodutos da mistura: a coronene cátion ($C_{24}H_{12}^+$), a coronene protonado ($C_{24}H_{13}^+$), a hidroxi- ($C_{24}H_{12}O_2$), ketone- ($C_{24}H_{10}O_2$) coronene, além de CO , CO_2 e H_2CO . Este trabalho é o primeiro estudo IR detalhado do efeito de diferentes concentrações de coronene em sua eficiência de ionização dos gelos de H_2O e seus

fotoprodutos formados. Há um link claro entre a concentração de coroneno e o rendimento do fotoproduto e, portanto, por implicação, com os tipos de fotoprodutos coronene presentes no gelo que estão disponíveis para reações subsequentes e processos.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado na NASA com auxílio as agências brasileiras CAPES (BEX 5383/15-3) CNPq (307418/2021-9) e FAPERJ (E-26/210.965/2021, E-26/210.801/2021, E-26/245.307/2019, E-26/202.549/2019 e E-26/200.320/2023).

Sobre a autora

Ana Lucia Barros (ana.barros@cefet-rj.br) é atualmente Professora Titular do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET-RJ (2006-). Tenho experiência nas seguintes áreas da Física: (i) Fenomenologia em Física de Altas Energias de Partículas, (ii) Óptica Não Linear e (iii) Física Atômica colisão e fragmentação de moléculas-UFRJ, espectrometria de massa e física de superfícies na PUC-Rio, colisões de íons pesados em GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), Caen, França e fótons no Centro de Pesquisa AMES da NASA. No CEFET/RJ. Sou coordenador do Doutorado em Óptica e Instrumentação Aplicada (PPGIO) - associação CEFET/RJ e UFF. Fundadora e coordenadora do Laboratório de Física Experimental e Aplicada (LaFEA) do CEFET desde 2006. Atualmente Bolsista 1-C do CNPq (307418/2021-9) e Cientista do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ (Edital: E-26/200.320/2023).

Referências

- [1] A. M. Cook et al., *Photochemistry of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Cosmic Water Ice: The Role of PAH Ionization and Concentration*, *The Astrophysical Journal* **799**(1), 14 (2015).
- [2] A. C. A. Boogert, P. A. Gerakines e D. C. B. Whittet, *Observations of the icy universe.*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **53**, 541 (2015). [ArXiv:1501.05317](https://arxiv.org/abs/1501.05317).

- [3] A. L. F. de Barros et al., *Photochemistry of Coronene in Cosmic Water Ice Analogs at Different Concentrations*, *Astrophysical Journal* **848**(2), 112 (2017).
- [4] Z. Guennoun, C. Aupetit e J. Mascetti, *Photochemistry of coronene with water at 10 K: first tentative identification by infrared spectroscopy of oxygen containing coronene products*, *Physical Chemistry Chemical Physics (Incorporating Faraday Transactions)* **13**(16), 7340 (2011).
- [5] J. Bouwman et al., *Photochemistry of the PAH pyrene in water ice: the case for ion-mediated solid-state astrochemistry*, *Astronomy and Astrophysics* **511**, A33 (2010). [ArXiv:0911.1750](https://arxiv.org/abs/0911.1750).
- [6] M. S. Gudipati e L. J. Allamandola, *Facile Generation and Storage of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Ions in Astrophysical Ices*, *Astrophysical Journal Letters* **596**(2), L195 (2003).

Os efeitos da matéria em neutrinos de supernovas

Bianca B. Martins e Pedro C. Holanda

Universidade Estadual de Campinas

Resumo

Emissões de neutrinos são fundamentais para a formação de supernovas, no entanto, o colapso do núcleo estelar e os efeitos das interações entre as partículas nesse ambiente de alta densidade não são completamente compreendidos. Sendo assim, o atual trabalho tem como objetivo estudar a relação entre os neutrinos e as supernovas por colapso gravitacional e explorar como as interações entre os neutrinos e o meio afetam a sua propagação. Nesse sentido, modela-se o comportamento dos neutrinos na matéria estelar de acordo com os formalismos de ondas planas e da matriz densidade, tal que as equações de evolução do neutrino são deduzidas analiticamente. Dessa forma, evidencia-se a ocorrência dos efeitos Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) e coletivos sobre os neutrinos de supernovas.

Abstract

Neutrino emissions are fundamental to the formation of supernovae, however, the collapse of the stellar core and the effects of interactions between particles in this high-density environment are not completely understood. Therefore, the current work aims to study the relationship between neutrinos and supernovae due to gravitational collapse and explore how interactions between neutrinos and the environment affect their propagation. In this sense, the behavior of neutrinos in stellar matter is modeled according to plane wave and density matrix formalisms, such that the neutrino evolution equations are analytically deduced. In this way, the occurrence of Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) and collective effects on supernova neutrinos is evident.

Palavras-chave: neutrinos de supernovas, efeito MSW, conversões de sabor

Keywords: supernovae neutrinos, MSW effect, flavor conversions

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44987](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44987)

1 Introdução

Propostos por Pauli, os neutrinos, partículas elementares que interagem fracamente com a matéria [1], são essenciais na compreensão da dinâmica da morte de estrelas massivas, isto é, estrelas com mais de $8 M_{\odot}$ [2]. Devido a reações nucleares, neutrinos são produzidos no interior estelar e escapam da estrela carregando energia e, portanto, aceleram a evolução do astro até a formação do núcleo estelar de ferro e a sua instabilidade. Então, com as reações de captura eletrônica e de fotodesintegração, a estrela entra em colapso gravitacional, quando as camadas externas de matéria da estrela caem sobre as camadas internas [3]. No entanto, esse fenômeno é interrompido quando o astro atinge densidades nucleares, o que gera a formação de uma onda de pressão em direção às camadas externas da estrela, responsável pela ejeção de matéria e de radiação [4]. Simulações computacionais indicam que os neutrinos podem ser os responsáveis pela efetividade da propagação dessa

onda de choque e, por conseguinte, pela explosão da estrela [5].

A relação entre essas partículas e a morte de estrelas foi comprovada em 1987 com a detecção de neutrinos vindos da Supernova SN1987A em experimentos terrestres, Kamiokande II [6], Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB) [7] e Baksan [8]. Nesse sentido, a explosão de uma supernova (tipo Ib, Ic ou II [9]) libera 99% da sua energia gravitacional na forma de neutrinos [4], os quais podem ser medidos para obtenção de informações acerca da dinâmica da supernova, do mecanismo de explosão da estrela, da fenomenologia de neutrinos e da formação de remanescentes, estrelas de nêutrons ou buracos negros.

Segundo o Modelo Padrão das Partículas Elementares, existem três tipos de neutrinos, diferenciados pelo número quântico de sabor, que seriam partículas sem massa [1]. No entanto, sabe-se que os neutrinos possuem diferenças de massa entre si, informação comprovada pela oscilação quântica de sabor

dos neutrinos, ou seja, a coexistência de seus auto-estados de massa e o colapso deles em um sabor de neutrino durante uma medição após propagação espacial [10]. Esse fenômeno ocorre mesmo no vácuo, porém, como a matéria estelar em colapso constitui um meio de densidades que atingem valores nucleares e de temperaturas extremas, essas oscilações são modificadas devido a interações entre os neutrinos e o meio [11] e entre os próprios neutrinos [12], os efeitos Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) e coletivos. Sendo assim, o atual trabalho abordou e quantificou as conversões de sabor dos neutrinos no ambiente da supernova. Para tanto, houve a dedução das equações de onda e de evolução dos neutrinos com a inserção gradual de um meio com e sem aproximações.

2 Metodologia

2.1 O formalismo de ondas planas

A princípio, foi utilizada a descrição do neutrino pelo formalismo de ondas planas, no qual trabalha-se diretamente com equações de onda dos neutrinos e a sua representação como a combinação linear dos auto-estados de massa;

$$|v_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k}^* |v_k\rangle \quad (1)$$

em que $U_{\alpha k}$ são os elementos da matriz de mistura U e $\alpha = (e, \mu, \tau)$ [10]. Nessa abordagem, assume-se que os neutrinos se propagam com a velocidade da luz e que os neutrinos massivos correspondentes a um estado de sabor possuem o mesmo momento \vec{p} . Essas considerações são adequadas no vácuo e em estrelas de baixa massa, e, portanto, foram utilizadas em um momento inicial. Porém, em supernovas os neutrinos sofrem colisões que afetam as fases da sua equação de evolução, isto é, eles se propagam com diferentes momentos.

2.2 O formalismo da matriz densidade

Nessa abordagem, cada neutrino massivo pode apresentar momento e energia distintos, tal que um sabor de neutrino corresponde à superposição de pacotes de onda [10], usualmente representados por uma matriz de densidade de neutrinos. Considere a matriz densidade ρ , que corresponde a um operador

representado na base de sabor, em três famílias de neutrinos [13]:

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{ee} & \rho_{e\mu} & \rho_{e\tau} \\ \rho_{\mu e} & \rho_{\mu\mu} & \rho_{\mu\tau} \\ \rho_{\tau e} & \rho_{\tau\mu} & \rho_{\tau\tau} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Note que os elementos diagonais do operador representam os estados puros e os não diagonais, os estados mistos. A representação dos elementos da matriz densidade se conecta com o formalismo de ondas planas da equação 1 pela seguinte relação:

$$\rho_{ij} = \sum_{ij} |v_i\rangle \langle v_j| \quad (3)$$

2.2.1 A equação de evolução dos neutrinos

A evolução dessa matriz é dada por [14]:

$$i \frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} = [\Omega_{\vec{p}}^0, \rho_{\vec{p}}] + [\Omega_{\vec{p}}^{int}, \rho_{\vec{p}}] + \mathbf{C}[\rho_{\vec{p}}, \bar{\rho}_{\vec{p}}] \quad (4)$$

Por um lado, o primeiro comutador está presente em toda evolução de neutrinos, isto é, mesmo no vácuo, pois depende apenas do momento \vec{p} e da matriz de massa \mathbf{M}^2 dos neutrinos [15]:

$$\Omega_{\vec{p}}^0 = (|\vec{p}|^2 + \mathbf{M}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Porém, o segundo comutador representa o potencial do meio sobre os neutrinos devido à interação entre os léptons [14].

$$\Omega_{\vec{p}}^{int} = \sqrt{2}G_F \left[L - \frac{8p}{3m_W^2} E \right] + \sqrt{2}G_F \left[\rho - \bar{\rho} - \frac{8p}{3m_Z^2} (U + \bar{U}) \right] \quad (6)$$

Onde o primeiro colchete envolve o número de densidade dos léptons, L , e a energia dos léptons carregados, E . Por outro lado, o segundo colchete se refere a reações de correntes neutras [14]. Como depende de interações do meio, esse comutador não está presente em oscilações no vácuo. Já o terceiro comutador, que envolve o termo de colisão, contabiliza as interações dos neutrinos com o meio e também as auto interações entre os neutrinos [14].

$$\mathbf{C}[\rho_{\vec{p}}, \bar{\rho}_{\vec{p}}] = \left(\frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} \right)_{CC} + \left(\frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} \right)_{NC} + \left(\frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} \right)_S \quad (7)$$

Nas equações, $\rho = \int \frac{d^3\mathbf{p}}{(2\pi)^3} \rho_{\vec{p}}$ e $U = \int \frac{d^3\mathbf{p}}{(2\pi)^3} \mathbf{p} \rho_{\vec{p}}$ [14].

Podem ou não ser feitas aproximações sobre as equações para encontrar uma solução. Nesse viés, serão utilizadas a expansão perturbativa e o regime adiabático de evolução da estrela.

3 Resultados

3.1 Equações de evolução no vácuo

Como não há interações dos neutrinos com o meio nem dos neutrinos consigo mesmos, sabemos que $\Omega_{\vec{p}}^{int} = 0$ e $\rho_{\vec{p}} = \overline{\rho_{\vec{p}}}$, resultando na anulação de comutadores. Logo:

$$i \frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} = [\Omega_{\vec{p}}^0, \rho_{\vec{p}}] \Rightarrow \frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} = -i[\Omega_{\vec{p}}^0, \rho_{\vec{p}}] \quad (8)$$

Então, com a expansão das matrizes envolvidas em matrizes de Pauli e da suposição de que o fluxo inicial de neutrinos emitido é totalmente composto por neutrinos eletrônicos, chegou-se na seguinte solução para duas famílias de neutrinos:

$$\rho(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\theta & \frac{1}{2} e^{i(\frac{\Delta m^2}{2E}t)} \\ \frac{1}{2} e^{-i(\frac{\Delta m^2}{2E}t)} & \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

3.2 Equações de evolução na matéria

Perante a solução 8, é possível fazer uma expansão perturbativa para encontrar uma aproximação à solução da equação 4 para meios em que há matéria. Para tanto, são consideradas as diferentes reações que ocorrem no meio, tal que é originada uma Hamiltoniana de interação, a qual depende dos campos B que atuam no sistema, como o campo dos elétrons e dos demais neutrinos do meio, e do campo de neutrinos ψ , tal que ambos dependem do tempo [16]:

$$H_{int}(t) = H_{int}(B(t), \psi(t)) \quad (10)$$

Podemos supor que a Hamiltoniana total depende apenas dos campos individuais, ou seja, das Hamiltonianas individuais que atuam sobre o sistema $[\Omega_{\vec{p}}^{int}(t)]_i$ [16]:

$$H_{int}(t) = \sum_i [\Omega_{\vec{p}}^{int}(t)]_i \quad (11)$$

Nesse viés, e supondo que os campos iniciais evoluem livremente, a solução se torna [15]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} &= -i[\Omega_{\vec{p}}^0, \rho_{\vec{p}}] + i\langle [H_{int}^0(t), D_{\vec{p}}^0] \rangle \\ &\quad - \int_0^t dt' \langle [H_{int}^0(t-t'), [H_{int}^0(t), D_{\vec{p}}^0]] \rangle \end{aligned} \quad (12)$$

Adotando a aproximação adiabática ou desconsiderando os termos de segunda ordem, podemos reescrever a equação de evolução em termos das diferentes categorias de reações que podem ocorrer e afetar os neutrinos, as correntes carregadas (CC), as correntes neutras (NC) e as auto interações (S). Cada uma delas apresenta uma Hamiltoniana correspondente, logo, podemos escrever a variação da matriz densidade como a soma das variações devido à cada tipo de reação, somada à contribuição do vácuo [15]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} &= [\Omega_{\vec{p}}^0, \rho_{\vec{p}}] + \left(\frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} \right)_{CC} \\ &\quad + \left(\frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} \right)_{NC} + \left(\frac{d\rho_{\vec{p}}}{dt} \right)_S \end{aligned} \quad (13)$$

4 Discussão

Enquanto o primeiro termo da equação 12 corresponde ao resultado no vácuo, o segundo representa a solução em primeira ordem em um meio, isto é, às reações de *forward scattering*, ou seja, reações de espalhamento com léptons carregados em que há conservação de momento [15]. Quando ocorrem entre léptons e neutrinos, elas correspondem ao efeito Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW) [11], tal que as reações de espalhamento afetam a propagação dos neutrinos porque atuam como um índice de refração ao introduzir diferenças de fases na função de onda do neutrino [11]. Pode existir uma região da estrela em que este efeito é máximo, a região de ressonância [11].

Por outro lado, a integral da equação 12 é a solução perturbativa em segunda ordem e inclui tanto o *forward scattering* quanto o *non-forward scattering* (espalhamento sem conservação de momento) para diferentes partículas [15]. No núcleo da estrela, a solução analítica dessa integral é desconhecida e espera-se que os neutrinos oscilem seus sabores de forma coerente uns com os outros, os efeitos coletivos [17]. Por outro lado, nos primeiros 1.000km após a neutrinosfera, o efeito MSW dá origem a efeitos

não lineares, que permitem transições entre os auto-estados de massa [18]. Todavia, considerar espalhamentos não conservativos nas contas implica em considerar também o fenômeno da descoerência quântica [15].

Já a expressão 13 demonstra que a consideração ou não de diversas reações que ocorrem nas supernovas afeta a evolução da matriz densidade. Em cada região da estrela há processos dominantes: no interior da estrela, dominam as auto interações entre os neutrinos, mas, conforme a densidade da estrela diminui, predomina o efeito MSW e, eventualmente, a densidade cai o suficiente para que o efeito MSW deixe de dominar [3]. Sendo assim, diferentes reações podem ser consideradas na equação de acordo com a região da estrela.

5 Considerações finais

O fenômeno quântico da conversão de sabor de neutrinos ocorre no vácuo, mas a presença de matéria em grandes densidades altera esse processo. Em supernovas por colapso do núcleo estelar, as grandes densidades possibilitam a ocorrência de oscilações de sabor coletivas entre todos os neutrinos, e, além da neutrinofera, as reações de espalhamento entre os neutrinos e as partículas da matéria estelar corroboram ao efeito MSW.

A modelagem desses efeitos sobre os neutrinos pode ser realizada com a consideração de neutrinos como pacotes de onda e com a utilização do formalismo da matriz densidade. Nesse sentido, foi possível encontrar a equação de evolução do neutrino por meio de uma expansão perturbativa, cuja solução contém tanto a contribuição das oscilações no vácuo quanto o efeito MSW em primeira ordem, espalhamentos em segunda ordem e as auto-interações do efeito coletivo. No entanto, uma solução completa requer encontrar todas as hamiltonianas de interação entre os neutrinos e o meio, o que inclui equações não lineares e simulações computacionais. Além disso, ainda não há consenso sobre como abordar os efeitos coletivos. É importante notar que isso é um problema científico em aberto.

Agradecimentos

Agradeço aos organizadores do evento e ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico

e Tecnológico (CNPq) e do Serviço de Apoio ao Estudante (SAE) da Universidade Estadual de Campinas.

Sobre a autora

Bianca Bulhões Martins é graduanda em Física pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) (martins.biancabulhoes@gmail.com). Nascida em Governador Valadares, a mineira participou de três projetos de iniciação científica em que foi bolsista pelo CNPq ou pelo SAE-Unicamp. Atuou também como monitória voluntária de Física Quântica I. Tem interesse nas áreas de Astrofísica, Física de Partículas e Relatividade Geral.

Sobre o autor

Pedro Cunha de Holanda (holanda@unicamp.br) possui graduação em Física pela Universidade Estadual de Campinas (1995), mestrado (1997) e doutorado (2001) em Física pela mesma universidade. Foi contratado como professor da Universidade Estadual de Campinas em 2006, e obteve o título de livre-docência em 2012. Atualmente é professor MS5 do Instituto de Física Gleb Wataghin - Unicamp. Tem trabalhado em temas de interface entre a Física, Astrofísica e Cosmologia de Neutrinos. Obteve sua livre docência e atualmente é professor MS5-3.

Referências

- [1] G. d. A. Valdivieso e M. M. Guzzo, *Compreendendo a oscilação dos neutrinos*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 495 (2005).
- [2] S. Woosley e T. Janka, *The physics of core-collapse supernovae*, *Nature Physics* **1**(3), 147 (2005). [ArXiv:astro-ph/0601261](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0601261).
- [3] H.-T. Janka, *Neutrino Emission from Supernovae*, in *Handbook of Supernovae*, editado por A. W. Alsabti e P. Murdin (2017), 1575.
- [4] G. G. Raffelt, *Particle Physics From Stars*, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **49**, 163 (1999). [ArXiv:hep-ph/9903472](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9903472).

- [5] A. Burrows e D. Vartanyan, *Core-collapse supernova explosion theory*, *Nature* **589**(7840), 29 (2021). [ArXiv:2009.14157](#).
- [6] K. S. Hirata et al., *Observation in the Kamiokande-II detector of the neutrino burst from supernova SN1987A*, *Phys. Rev. D* **38**, 448 (1988).
- [7] R. M. Bionta et al., *Observation of a neutrino burst in coincidence with supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud*, *Physics Review Letters* **58**(14), 1494 (1987).
- [8] E. N. Alexeyev et al., *Detection of the neutrino signal from SN 1987A in the LMC using the INR Baksan underground scintillation telescope*, *Physics Letters B* **205**(2-3), 209 (1988).
- [9] B. W. Carroll e D. A. Ostlie, *An introduction to modern astrophysics* (Cambridge University Press, 2017).
- [10] C. Giunti e C. W. Kim, *Fundamentals of neutrino physics and astrophysics* (Oxford university press, 2007).
- [11] A. Y. Smirnov, *The MSW Effect and Matter Effects in Neutrino Oscillations*, *Physica Scripta* **T121**, 57 (2005).
- [12] H. Duan, G. M. Fuller e Y.-Z. Qian, *Simple picture for neutrino flavor transformation in supernovae*, *Physical Review D* **76**(8), 085013 (2007). [ArXiv:0706.4293](#).
- [13] A. Mirizzi et al., *Supernova neutrinos: production, oscillations and detection*, *Nuovo Cimento Rivista Serie* **39**(1-2), 1 (2016). [ArXiv:1508.00785](#).
- [14] J. Lesgourgues et al., *Neutrino cosmology* (Cambridge University Press, 2013).
- [15] G. Sigl e G. Raffelt, *General kinetic description of relativistic mixed neutrinos*, *Nuclear Physics B* **406**(1), 423 (1993).
- [16] G. G. Raffelt, *Stars as laboratories for fundamental physics : the astrophysics of neutrinos, axions, and other weakly interacting particles* (1996).
- [17] H. Duan, G. M. Fuller e Y.-Z. Qian, *Collective Neutrino Oscillations*, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **60**, 569 (2010). [ArXiv:1001.2799](#).
- [18] F. P. Soler, C. D. Froggatt e F. Muheim, *Neutrinos in particle physics, astrophysics and cosmology* (CRC Press, 2008).

Classificação cinemática de AGNs: busca por feedback em galáxias do MaNGA

Clara Rosin Gomes¹, Diogo Martins Souto¹ e Rogemar André Riffel²

¹Universidade Federal de Sergipe

²Universidade Federal de Santa Maria

Resumo

Galáxias com núcleos ativos (AGN) possuem um buraco negro supermassivo central (SMBH) que emite *outflows* e jatos de radiação e partículas. Em alguns casos, esse SMBH interfere na dinâmica da galáxia hospedeira alterando sua formação estelar. Tal fenômeno é denominado *feedback*. Neste trabalho, é analisada uma amostra de 62 galáxias presente em Sandro B. Rembold et al. (2017) [1] observadas pelo MaNGA para determinar quais são passíveis de apresentar processo de *feedback*. Para isso, examinamos os campos de velocidades das estrelas e do gás H α de cada galáxia para verificar se a rotação de ambos parâmetros é semelhante, visto que galáxias que possuem campos de velocidades distintos são sujeitas a estarem sofrendo processos de *feedback*. As classificações utilizadas neste trabalho são separadas em três classes: campo de velocidades de padrão regular (CVPR), campo de velocidades de padrão irregular (CVPI) e campo de velocidades em contrarotação (CVCR). Cada galáxia da amostra também tem suas regiões nuclear e extranuclear classificadas em seyfert, LINER, composta ou região de formação estelar. Isso é feito através da análise do diagrama BPT de cada galáxia analisada. De acordo com as classificações supracitadas, pode-se fazer um estudo da proporção de cada tipo de classificação para cada tipo de AGN.

Abstract

Galaxies with active nuclei (AGN) have a central supermassive black hole (SMBH) that emits outflows and jets of radiation and particles. In some cases, this SMBH interferes with the dynamics of the host galaxy, altering its star formation. Such a phenomenon is called feedback. In this work, a sample of 62 galaxies present in Sandro B. Rembold et al. (2017) [1] observed by MaNGA to determine which are likely to present a feedback process. To do this, we examine the velocity fields of the stars and the H α gas of each galaxy to check whether the rotation of both parameters is similar, since galaxies that have different velocity fields are likely to be undergoing feedback processes. The classifications used in this work are separated into three classes: regular pattern velocity field (CVPR), irregular pattern velocity field (CVPI) and counter-rotating velocity field (CVCR). Each galaxy in the sample also has its nuclear and extranuclear regions classified into seyfert, LINER, composite or star-forming region. This is done by analyzing the BPT diagram of each galaxy analyzed. According to the aforementioned classifications, a study can be made of the proportion of each type of classification for each type of AGN.

Palavras-chave: astrofísica, buraco negro, galáxia

Keywords: astrophysics, black hole, galaxy

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44991](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44991)

1 Metodologia

O MaNGA (*Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory*) é um projeto do SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) que visa observar 10 mil galáxias próximas no espectro do visível. Para isso, é utilizado a espectroscopia de campo integral (IFS) que permite observar cada galáxia integralmente de uma só vez. A IFS gera cubos de dados com o espectro de cada spaxel da galáxia (BUNDY, K. et al, 2014) [2].

Neste trabalho, utilizamos 62 galáxias do MaNGA e as analisamos através de um ambiente em Python denominado Marvin (CHERINKAL, B. et al, 2019) [3]. Foram geradas três imagens para cada galáxia: um mapa do campo de velocidades do gás H α , outro de velocidades de estrelas, como é possível ver na figura 1, e um diagrama BPT, assim como nas figuras 2 e 3.

Através da comparação entre os campos de velocidades, é possível classificar a amostra em três grupos:

- *Campo de velocidades com padrão regular*

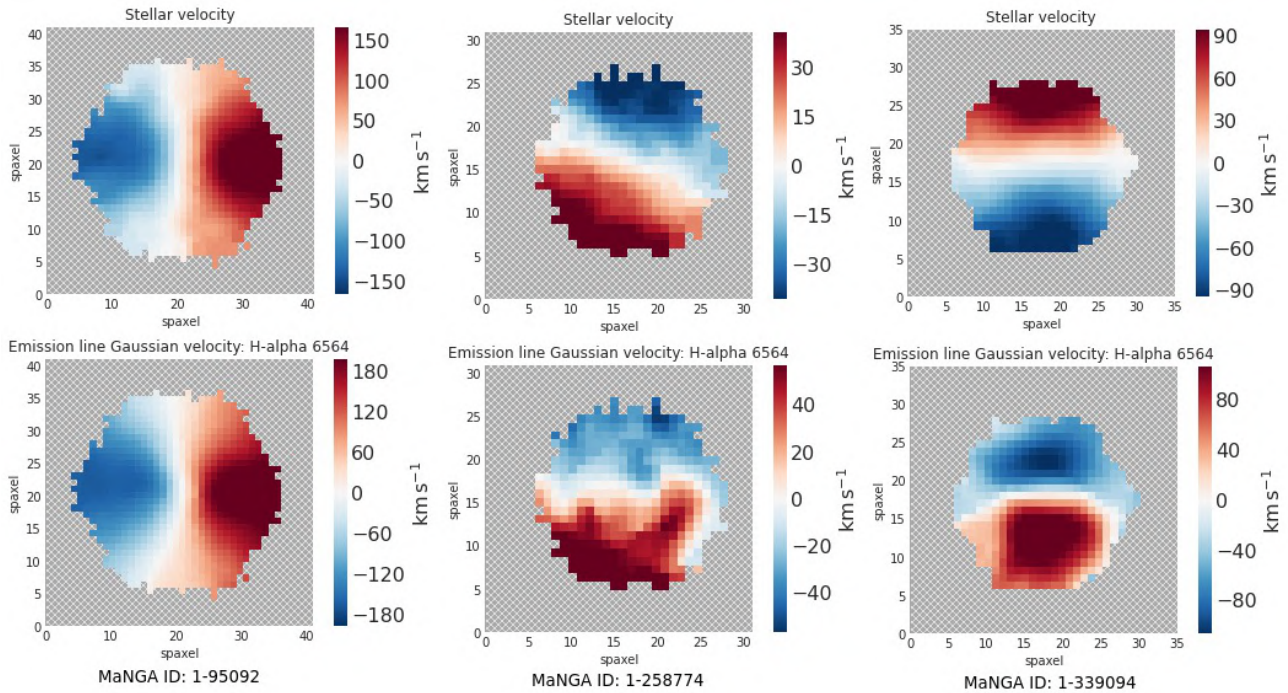


Figura 1: Exemplo de três galáxias da amostra: cada uma representa um grupo de classificação. A primeira é CVPR, a segunda é CVPI e a terceira, CVCR. Imagem gerada no Marvin.

(CVPR): o mapa do campo de velocidade do gás $H\alpha$ é semelhante ao mapa do campo de velocidade das estrelas, ou seja, gás e estrelas rotacionam igualmente conforme o esperado;

- *Campo de velocidades com padrão irregular (CVPR):* gás e estrelas tem campos de velocidades distintos em uma ou mais regiões;
- *Campo de velocidades em contra-rotação (CVCR)* mapa do campo de velocidade do gás $H\alpha$ e o mapa do campo de velocidade das estrelas mostram que o gás e as estrelas rotacionam em direções opostas.

2 Resultados

Através da comparação entre a cinemática estelar e dos gases em escalas de kpc é possível reestudar qualitativamente o possível impacto dos *outflows* do AGN em sua galáxia hospedeira: é esperado que galáxias inativas possuam mapas de campo de velocidades estelar e de gás em larga escala semelhantes pois ambos rotacionam igualmente; já em galáxias com núcleos ativos são esperado mapas de campos de velocidade de gás perturbados em comparação ao

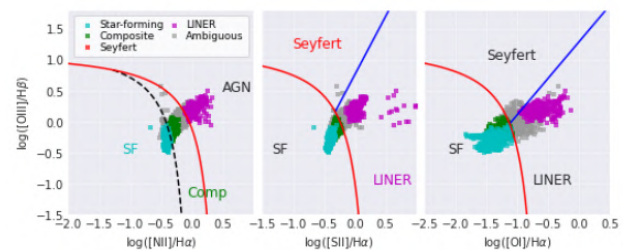


Figura 2: Diagrama BPT da galáxia 1-339163 gerado no Marvin.

campos de velocidade estelar devido ao efeito causado pelos fortes *outflows* (ILHA et al, 2019) [4] que geram perturbações no movimento dos gases. Através da análise de cada mapa de campo de velocidades de $H\alpha$ e estrelas e do diagrama BPT de cada galáxia da amostra foi possível construir uma tabela com a comparação entre os campos de velocidades de gás e estrelas assim como com a classificação de suas regiões nuclear e extranuclear de acordo com o diagrama BPT de cada galáxia da amostra. A tabela 1 mostra apenas as 14 primeiras galáxias da amostra.

A partir da análise da tabela da amostra completa foi possível gerar o histograma da quantidade de cada grupo cinemático para cada tipo de AGN, como pode ser observado na figura 4. Também é observado que

<i>MaNGA ID</i>	<i>Classificação</i>	<i>Região nuclear</i>	<i>Região extranuclear</i>
1-558912	CVPI	Seyfert	Seyfert, LINER e composto
1-269632	CVPR	Ambíguo	Seyfert, composto, FE e LINER
1-258599	CVPI	Seyfert	Seyfert
1-72322	CVPR	Seyfert	Seyfert, composto, FE e LINER
1-121532	CVPI	Seyfert e LINER	LINER e seyfert
1-209980	CVPR	Seyfert	LINER e composto
1-44379	CVPR	Seyfert	FE, composto e seyfert
1-149211	CVPI	Seyfert	Seyfert
1-173958	CVPR	Ambíguo	FE, composto e LINER
1-338922	CVPR	LINER	LINER
1-279147	CVPI	Seyfert	Seyfert, LINER e composto
1-460812	CVPR	Seyfert	LINER
1-92866	CVPI	LINER	LINER
1-94784	CVPR	Seyfert	FE, LINER e composto

Tabela 1: As galáxias que possuem mais de um tipo de região nuclear e/ou extranuclear foram classificadas de forma decrescente: da maior quantidade de spaxels para a menor. Por exemplo, a galáxia 1-121532 possui mais spaxels classificados como LINER do que seyfert em suas regiões extranucleares.

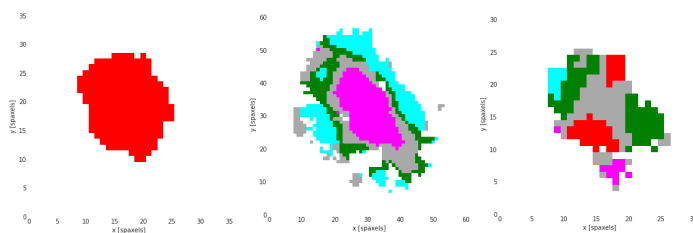


Figura 3: Diagrama BPT complementar mostrando a classificação de cada spaxel das galáxias 1-339094, 1-339163 e 1-269632, respectivamente, em coordenadas celeste. Imagem gerada no Marvin.

existem muito mais galáxias com rotação com padrão regular do que irregular ou em contrarotação, como é possível ver na figura 5.

3 Conclusões

A partir da análise da literatura, dos dados do MaNGA e do ambiente Marvin, foram gerados dois mapas de campos de velocidade para cada galáxia da amostra: um do gás H α e outro das estrelas. A partir da comparação desses mapas foi possível classificar cada galáxia de acordo com a similaridade entre os mapas. Como mostra a figura 5, 64.5% da amostra

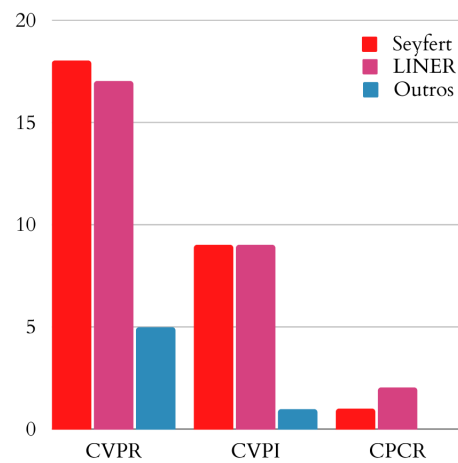


Figura 4: Histograma de cada tipo de AGN e cada classificação cinemática

possui mapas similares, ou seja, estrelas e gás rotacionam igualmente, o que é esperado de uma galáxia inativa ou que não haja *feedback*. Já os outros 35.5% da amostra possuem perturbações nas rotações sendo 30.6% perturbações irregulares e apenas 4.8% contrarotação.

Com os métodos utilizados neste trabalho, não é possível afirmar a causa exata dos processos que causam perturbações nessas rotações. O programa utili-

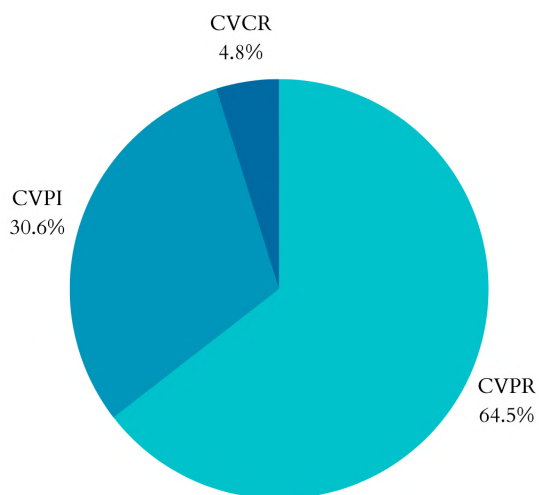


Figura 5: Gráfico em pizza apontando a quantidade percentual de cada classificação cinemática

zado (Marvin) possui limitações e utiliza apenas uma função para ajustar cada linha de emissão. Assim, não é possível modificar esse parâmetro. Para estudar com mais detalhes as perturbações na cinemática dos gases é indispensável ajustar a quantidade necessária de funções, o que pode ser feita através do software IFSCube (DUTRA, 2022) [5].

Sobre a autora

Clara Rosin Gomes é graduada em Física (clara-rosingomes@hotmail.com): Astrofísica pela Universidade Federal de Sergipe (UFS) e atualmente está realizando o mestrado em Física na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Meu trabalho concentra-se no estudo de galáxias com núcleos ativos (AGNs), com foco na investigação da cinemática e estrutura do hidrogênio molecular e ionizado na galáxia MCG+08-11-011.

Sobre os autores

Diogo Martins Souto é professor adjunto da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Rogemar André Riffel é professor adjunto da Universidade Federal de Santa Maria.

Referências

- [1] S. B. Rembold et al., *The first 62 AGNs observed with SDSS-IV MaNGA - I. Their characterization and definition of a control sample*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **472**(4), 4382 (2017). [ArXiv:1709.10086](https://arxiv.org/abs/1709.10086).
- [2] K. Bundy et al., *Overview of the SDSS-IV MaNGA Survey: Mapping nearby Galaxies at Apache Point Observatory*, *Astrophysical Journal* **798**(1), 7 (2015). [ArXiv:1412.1482](https://arxiv.org/abs/1412.1482).
- [3] B. Cherinka et al., *Marvin: A Tool Kit for Streamlined Access and Visualization of the SDSS-IV MaNGA Data Set*, *Astronomical Journal* **158**(2), 74 (2019). [ArXiv:1812.03833](https://arxiv.org/abs/1812.03833).
- [4] G. S. Ilha et al., *The first 62 AGN observed with SDSS-IV MaNGA - III: stellar and gas kinematics*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **484**(1), 252 (2019). [ArXiv:1903.08071](https://arxiv.org/abs/1903.08071).
- [5] D. Ruschel-Dutra et al., *AGNIFS survey of local AGN: GMOS-IFU data and outflows in 30 sources*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **507**(1), 74 (2021).

CLASS/HI-CLASS como uma ferramenta de trabalho e ensino de cosmologia e programação

Cristiane Fontana

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

Resumo do pôster apresentado na segunda edição do evento As Astrocientistas, realizado entre os dias 7 e 10 de fevereiro 2023.

Abstract

Summary of the poster presented in the second edition of the As Astrocientistas event, held between 7 and 10 February 2023.

Palavras-chave: cosmologia, CLASS, radiação cósmica de fundo

Keywords: cosmology, CLASS, cosmic microwave background

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44993](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44993)

1 Discussão

A cosmologia é o estudo da origem, composição, estrutura e evolução do Universo. Este estudo se dá através da aplicação da Física já estabelecida e da coleta de dados disponíveis para caracterizar a estrutura cosmológica. Para descrever o Universo, necessita-se inferir sua composição, sua configuração inicial e os processos que afetam a evolução desse estado. A composição do Universo parece ser essencialmente matéria (escura e bariônica), radiação e energia escura. A era da inflação criou as pequenas perturbações que hoje evoluíram para formar galáxias, aglomerados de galáxias e a estrutura de larga escala que vemos. Unidos de uma Teoria da Gravitação e da Mecânica Estatística, é possível obter previsões para diferentes modelos de universos e diferentes configurações iniciais. As contas que necessitamos resolver para obter essas previsões são sistemas de equações diferenciais que muitas vezes não tem solução exata e necessitam de muitas operações. Para obter as evoluções das sobredensidades de matéria e a forma da radiação cósmica de fundo (CMB), foram criados vários códigos de Boltzmann que integram as equações e até mesmo plotam os resultados.

Um desses códigos é o *Cosmic Linear Anisotropy Solving System* (CLASS) [1]. É extremamente robusto, rápido e preciso, possui passo de integração

adaptável e testes de viabilidade cosmológica já implementados. O CLASS computa o espectro da CMB e o espectro de potência da matéria através da evolução das perturbações advindas do Universo primordial, além de obter a evolução das quantidades usuais do fundo cosmológico, como a temperatura, as densidades das componentes e a função de Hubble. Possui versão com implementação de gravitação modificada via teoria de Horndeski [2]. Dentre as vantagens deste código está o fato de que é um código fácil de usar, flexível de modificar, rápido e preciso. Isto o torna uma ferramenta excelente tanto de pesquisa quanto de educação.

O uso científico desse código é reconhecido na comunidade acadêmica. O artigo em que este código foi apresentado possui mais de 1500 citações. Destaca-se a utilização do CLASS para obter o espectro de potência da matéria para diferentes parâmetros de *input*. Um outro uso é implementação de nova física através de equações adicionais e inclusão de novas componentes para o Universo. No entanto, propõe-se a popularização do CLASS no seu aspecto educacional. Sugerem-se 2 maneiras de inclusão deste código em cursos de cosmologia:

A facilidade de uso permite que o professor faça figuras personalizadas dos assuntos que deseja evidenciar. É possível visualizar diversos aspectos do modelo Λ CDM, como a diminuição de temperatura dos

fótons ao longo do tempo, a variação das densidades de energia das componentes e a previsão estatística do espectro de potência da matéria para diferentes valores da densidade fracional de matéria Ω_{m0} .

A forma explicativa e simplificada do arquivo de *input* também permite que um curso de Cosmologia seja montado de forma que os alunos interajam diretamente com o código. O professor inicialmente sugere que os alunos executem o código com os valores padrões da Cosmologia, e então propõe alguns diferentes cenários, como diferentes valores iniciais do parâmetro de Hubble h e universos contendo apenas radiação e matéria bariônica. Após, ele encoraja os estudantes a explorar com autonomia as possibilidades de *input* e as consequências das condições escolhidas, que se refletem na evolução do fundo cosmológico e na forma do espectro de potência da matéria. A tarefa dada aos alunos é a de escolher um tipo de mudança com relação aos valores padrões usados pelo CLASS no modelo cosmológico padrão e então analisar visualmente as diferenças nos gráficos que surgem das quantidades calculadas pelo código. Dentre as coisas que se pode escolher estão a presença ou não de neutrinos, a quantidade fracional de matéria bariônica e de matéria escura, o valor da constante cosmológica, o valor da constante de Hubble, etc. Espera-se que o aluno possa obter através dessa atividade uma intuição de como a Cosmologia é desenvolvida, expondo-os diretamente ao método científico, que envolve desde a proposição de ideias até o confronto com os dados experimentais. O aluno deve concluir que as diferentes hipóteses sobre a constituição e história do Universo geram diferentes previsões de quantidades que são testadas através de evidências experimentais.

Uma terceira ideia é a utilização do CLASS em cursos de Python para alunos de Cosmologia. Saber programar pode ser considerado essencial atualmente dentro da Cosmologia, e é uma habilidade que deve ser estimulada pelos professores da área. Existem já iniciativas no sentido de aliar conteúdos de interesse do aluno para introduzir temas de computação, como por exemplo o curso “Métodos para Análise de grande volume de dados e Astroinformática”, oferecido em 2022 pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. O CLASS entra em iniciativas assim tanto como um provedor de dados como quanto um código que pode ser utilizado diretamente de Jupyter notebooks, contribuindo para a experiência do aluno com a linguagem Python.

Diante disso, conclui-se que o CLASS tem um grande potencial para ser usado como ferramenta educacional, contribuindo para partes essenciais da formação de um estudante de cosmologia. Sugere-se ao professor 3 formas de utilizar o CLASS em sala de aula, com diferentes focos e níveis de contato dos alunos com o programa em si. Em especial, propõe-se que o aluno seja estimulado a utilizar ele mesmo este programa, reforçando a autonomia do estudante na aprendizagem.

Sobre a autora

Cristiane Fontana é formada em física pela Universidade Federal de Santa Maria e Mestre em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas.

Referências

- [1] D. Blas, J. Lesgourgues e T. Tram, *The Cosmic Linear Anisotropy Solving System (CLASS). Part II: Approximation schemes*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2011(07)**, 034 (2011).
- [2] M. Zumalacárregui et al., *hi_class: Horndeski in the Cosmic Linear Anisotropy Solving System*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2017(08)**, 019 (2017).

Mulheres revolucionárias

Évila Talita Silva Aires

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão

Resumo

Resumo do pôster apresentado na segunda edição do evento As Astrocientistas, realizado entre os dias 7 e 10 de fevereiro 2023.¹

Abstract

Summary of the poster presented in the second edition of the As Astrocientistas event, held between 7 and 10 February 2023.

Palavras-chave: mulheres na ciência, história da astronomia, ensino de ciência

Keywords: women in STEM, history of astronomy, science teaching

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44990](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44990)

1 Introdução

Durante muito tempo, a ciência foi um campo reservado a poucas pessoas, predominantemente do sexo masculino. As mulheres foram excluídas da educação científica durante muitos anos, sendo esperado que elas se concentrassem no cuidado da casa e da família. Os efeitos desse atraso são vistos ainda hoje: as mulheres cientistas ocupam uma porcentagem bem baixa na Academia Brasileira de Ciências, somando apenas 14% [1], como também nas áreas de ciências da computação e matemática, e sem contar a desigualdade salarial e os constantes questionamentos sobre sua capacidade e competência.

“Homens necessitam experimentar trabalhar com mulheres como pares para aprenderem como se relacionar com astrônomas mulheres como astrônomas e não como mulheres” [2,3].

Nas áreas relacionadas às ciências exatas, as mulheres entram nas universidades e nas instituições superiores em um número bem pequeno comparado aos homens, e ao concluírem o curso superior, não há nenhuma garantia de que exercerão as profissões referentes aos saberes aprendidos na graduação.

Conhecem-se jovens que concluíram a graduação em uma das áreas das ciências “duras” e, ao longo

do tempo, experimentam outra área no mercado e acabam abandonando a profissão da sua graduação, sendo a física um exemplo notável de abandono desproporcional entre mulheres e homens a cada estágio da carreira [4]. As razões são diversas e envolvem muitos aspectos, tanto sociais como psicológicos.

A Figura 1 ilustra a desigualdade de gênero nas áreas de física e astronomia, matemática, economia e engenharia. Observa-se que as mulheres são minorias nessas áreas.

Na Astronomia as mulheres têm se inserido paulatinamente e, a partir do lugar que ocupam, têm combatido a invisibilidade feminina.

2 Mulheres astrônomas

A astronomia é uma ciência construída por muitos homens e um número baixo de mulheres. Mas elas sempre estiveram presentes, tiveram sua participação desde os primórdios. Registra-se como primeira estudiosa a sacerdotisa da Babilônia Hedu’Anna. Há 4000 anos ela ajudou a decifrar as estrelas e desenvolver os calendários, tornando-se símbolo e referência importante para astrônomos e matemáticos [6]. Outra que teve uma participação foi Hipatia, uma grega que vivia em Alexandria no século quarto e estudava astronomia, matemática e filosofia. Assim, ao longo da história vão surgindo nomes de muitas mulheres que contribuíram com a astronomia, porém nem sempre

¹Texto escrito sob orientação e edição da Prof. Carla Rodrigues Almeida

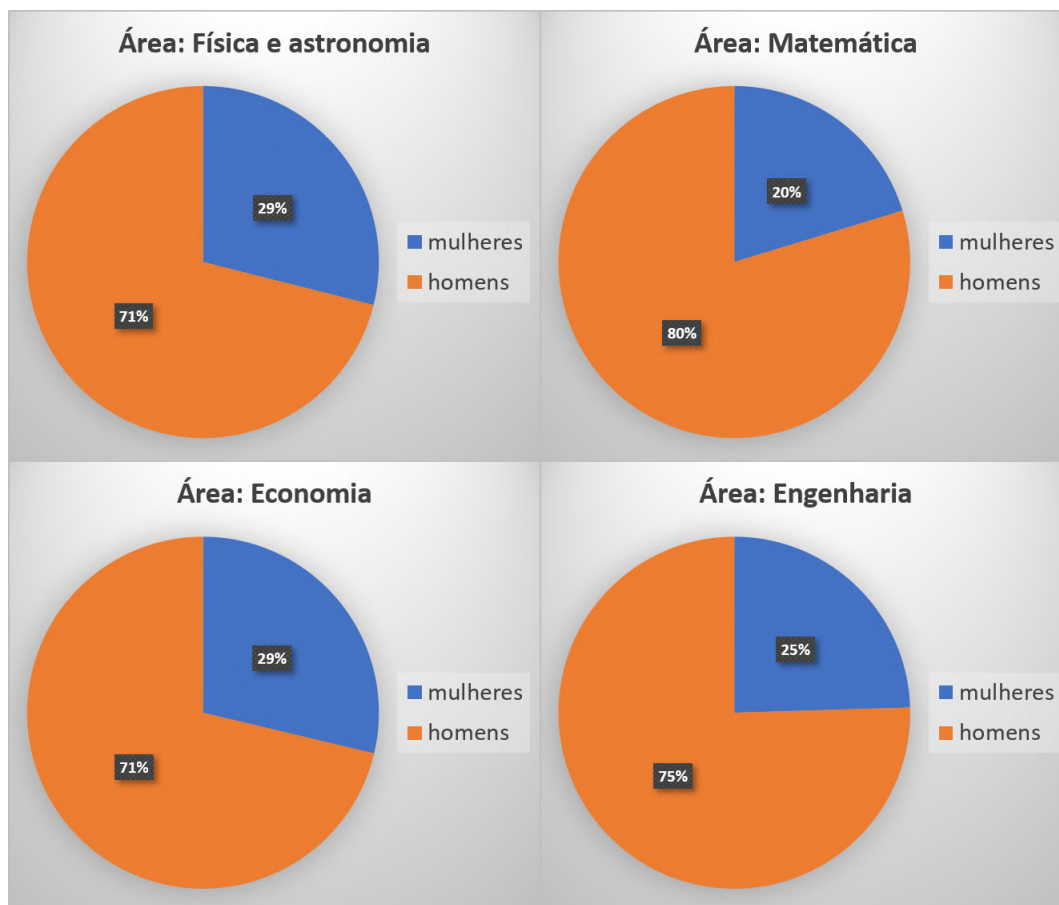


Figura 1: Gráfico “Desigualdade na ciência e a realidade das cientistas brasileiras”, retirado de [5].

são reconhecidas.

Superar a invisibilidade das mulheres é um desafio diário para todas e para cada uma de nós, especialmente em áreas como a ciência, onde sua carreira depende de ser reconhecida por suas contribuições intelectuais ao seu campo. Mas em meio a tudo isso, as mulheres não deixaram de fazer ciência, lutam todos os dias enfrentando obstáculos para alcançar seus objetivos.

Mais recentemente, podemos citar nomes de algumas mulheres que tiveram importante participação na astronomia.

Dorothy Vaughan, foi uma matemática e foi a primeira mulher negra a ser promovida como chefe de departamento da NASA; Dorothy sempre lutou pela participação de mulheres negras nas então chamadas “áreas para funcionários brancos”. O desafio era triplo: continuar o excelente trabalho, carregar o peso da responsabilidade de ser supervisora de tal departamento e lutar pelos direitos das mulheres negras na NASA.

Katherine Johnson, a primeira mulher a ter autoria

de artigos e responsável por calcular trajetórias para missões espaciais como a da Apollo 11, a primeira a pousar na lua. Seu trabalho foi fundamental para a exploração espacial dos EUA nos Projetos Mercury que levou o primeiro homem americano ao espaço em 1961.

Mae Carol Jemison é uma médica, engenheira e ex-astronauta estadunidense. Foi a primeira mulher negra a ir ao espaço, quando serviu como especialista de missão a bordo do ônibus espacial *Endeavour*.

Quando Mae Carol Jemison nasceu, em 17 de outubro de 1956, em Decatur, no Alabama, a NASA não permitia que mulheres fossem astronautas. Mulheres negras, como era o caso de Jemison, então, nem se fala! Mas isso não impediu que ela, crescendo em Chicago, sonhava em ir ao espaço. Determinada, ela se formou em Engenharia Química na Universidade Stanford e, depois, em Medicina na Universidade Cornell. Em 1987, ela conseguiu entrar para a NASA e, cinco anos depois, realizou o sonho de fazer parte da tripulação de um ônibus espacial — o *Endeavour*, na missão STS-47, que orbitou a Terra do dia

12 ao dia 20 de setembro de 1992.

Isso foi apenas um resumo da história das mulheres na ciência pois, cada vez mais, temos mulheres e meninas ingressando na ciência e na pesquisa e sendo responsáveis por diversas descobertas que ajudam a revolucionar o mundo. E muitas vezes ouvimos falar apenas sobre as descobertas dos homens e ficamos nos perguntando onde as mulheres ficam em meio a isso tudo. Mas as mulheres têm papéis muito importantes para o campo científico.

3 Conclusões

A história da educação feminina é permeada pela exclusão. Mas hoje as mulheres são maioria nas universidades brasileiras. Então podemos perceber como as mulheres vêm ganhando espaço na sociedade.

Por mais que o tema seja muito atual, as mulheres precisaram lidar com vários desafios para conseguir uma carreira científica há séculos, e muitas barreiras permanecem as mesmas. Mesmo com todas as dificuldades que tinham de ingressar no meio científico, não desistiram e diversas mulheres lutaram contra essas exclusões e marcaram presença nas Ciências Exatas, na Medicina, na Filosofia e nas Ciências Sociais, contradizendo teorias que pregavam dificuldades especificamente femininas para se dedicar aos estudos e às atividades intelectuais.

As mulheres ultrapassaram alguns limites de gênero e raça impostas pela sociedade. E mesmo com todas essas barreiras e preconceitos elas não desistiram de fazer ciência. Se hoje a mulher tem livre acesso ao ensino, essa foi uma dura conquista que só foi alcançada após uma árdua luta travada durante muito tempo pelas mulheres.

Sobre a autora

Évila Talita Silva Aires (evilatalita156@gmail.com) tem 18 anos e estuda engenharia agrônoma na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Ela se interessa pela temática de mulheres na ciência, pois às mulheres sempre enfrentaram muitos entraves na área da ciência e essa luta das mulheres sempre chamou muita atenção. Ela pretende continuar os estudos nesta área e assim produzir outros trabalhos e ajudar

outras meninas/mulheres na área da ciência. Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4221302470220100>.

Referências

- [1] A. Prusa e L. A. Picanço (eds.), *Snapshot of the status of women in Brazil: 2019* (Wilson Center – Brazil Institute, 2019). Disponível em <https://www.wilsoncenter.org/publication/snapshot-the-status-women-brazil-2019>, acesso em jan. 2024.
- [2] G. Clayton, *A male perspective: not equal, not yet*, *Mercury* **21**(1), 31 (1992).
- [3] E. F. Santos, J. O. dos Santos e I. F. Santos, *Astronomia: uma experiência em que mulheres atuam como protagonistas*, *Revista Temas em Educação* **27**(2), 134–151 (2018).
- [4] D. Agrello e R. Garg, *Mulheres na física: poder e preconceito nos países em desenvolvimento*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **31**(1), 1305.1–1305.6 (2009).
- [5] B. Lopes, *Desigualdade na ciência e a realidade das cientistas brasileiras*, *Revista Blog do Profissão Biotec* **10** (2023). Disponível em <https://profissaobiotec.com.br/desigualdade-ciencia-realidade-cientistas-brasileiras/>, acesso em jan. 2024.
- [6] E. S. Garcia, *Mulher e a Ciência*, Notícias do IOC (2006). Disponível em http://www.ioc.fiocruz.br/pages/informerede/corpo/noticia/2006/novembro/08_11_06_02.htm, acesso em jan. 2024.

Testando teorias de gravitação modificada com lentes gravitacionais

Fernanda Araujo Oliveira

Observatório Nacional

Resumo

Resumo do pôster apresentado na segunda edição do evento As Astrocientistas, realizado entre os dias 7 e 10 de fevereiro 2023.

Abstract

Summary of the poster presented in the second edition of the As Astrocientistas event, held between 7 and 10 February 2023.

Palavras-chave: gravitação modificada, lentes gravitacionais, testes gravitacionais

Keywords: modified gravity, gravitational lens, gravitational tests

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44986](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44986)

1 Introdução

As teorias de gravitação modificada têm se mostrado alternativas interessantes para explicar e resolver os problemas em aberto do modelo Λ CDM, o mais usado para a descrição do Universo e que adota a Relatividade Geral como teoria gravitacional, se baseando nas hipóteses de isotropia e homogeneidade em grandes escalas - o Princípio Cosmológico [1, 2]. Em especial, as teorias escalares-tensoriais [3] costumam ser as mais usadas como alternativas à RG devido a sua simplicidade relativa. As teorias *Beyond Horndeski* [4] se encaixam na classe de teorias escalares-tensoriais e compreendem diversos modelos de energia escura sem a constante cosmológica Λ , o que torna seu estudo interessante, já que a energia escura ainda é uma questão em aberto do Modelo Cosmológico Padrão [5].

Uma das ferramentas que pode ser utilizada para testar a Relatividade Geral e as teorias alternativas são as lentes gravitacionais, formadas como resultado da deflexão da luz por um campo gravitacional [6]. Seu uso é diverso, com aplicações em várias áreas da astrofísica e cosmologia. Há outras diversas formas de se testar teorias alternativas à RG no regime de curvatura intermediária, porém as lentes gravitacionais abrangem um maior alcance em diferentes escalas [7]. Por isso, optamos por utilizá-las no nosso

trabalho.

O lenteamento gravitacional pode ser classificado de acordo com sua escala angular e de intensidade. No caso da escala angular, pode ser separado em micro ou macrolenteamento. No caso do microlenteamento, as escalas angulares típicas (forma das imagens, separação entre elas) são pequenas a ponto de não serem observáveis com a instrumentação atual. O que pode ser medido é o efeito da magnificação. Neste caso, os objetos lenteados são estrelas ou quasares e as lentes são planetas ou estrelas. Já no macrolenteamento, as deformações das imagens ou a separação entre elas podem ser medidas. Nesse caso, as lentes são galáxias ou aglomerados de galáxias.

Com relação à intensidade, o lenteamento gravitacional pode ser classificado em forte ou fraco. No regime fraco, há leves distorções na imagem do objeto lenteado e pequena variação no seu brilho. No caso forte, há grandes distorções nas imagens, gerando a formação de imagens múltiplas, grandes magnificações, arcos e anéis de Einstein. Este último caso é formado quando há alinhamento quase perfeito entre observador, lente e fonte. Neste trabalho, consideraremos objetos em escala galáctica no regime do lenteamento forte.

2 Metodologia

Realizamos um teste de teorias alternativas à Relatividade Geral, em especial as teorias *Beyond Horndeski*, utilizando a combinação do efeito forte de lente gravitacional com a dinâmica estelar de galáxias. Nestas teorias, a razão entre os potenciais Φ e Ψ , que aparecem como perturbações escalares na métrica de FLRW [8], é diferente de um. A diferença entre esses potenciais pode ser testada comparando a massa inferida a partir dos fótons - massa *lensing* - com a massa inferida do movimento de objetos luminosos - massa dinâmica. Neste trabalho consideramos, em particular, a medida da dispersão de velocidade estelar de galáxias - sensível apenas ao potencial Φ - e, simultaneamente, o efeito de lente gravitacional - sensível à soma dos dois potenciais [8]. Foram obtidas expressões para a dispersão de velocidades medida em espectros (ou seja, considerando os efeitos observacionais) e para a equação da lente com a inserção de termos oriundos das teorias *Beyond Horndeski*. Utilizando essas expressões, é possível obter limites sobre parâmetros das teorias de gravidade modificada.

3 Resultados

Por fim, obtivemos uma relação entre o parâmetro pós-Newtoniano γ [9] e os parâmetros Y_1 e Y_2 - oriundos das teorias *Beyond Horndeski*. Estes parâmetros adimensionais estão diretamente relacionados às derivadas dos potenciais associados às perturbações escalares da métrica - Φ e Ψ [10]. Logo, observouse que os limites obtidos para γ podem ser usados para colocar limites sobre uma combinação dos parâmetros Y_1 e Y_2 . O que obtemos então é que a análise encontrada neste trabalho para o caso das teorias *Beyond Horndeski* é equivalente à análise do parâmetro γ , ou seja, é equivalente ao caso da Relatividade Geral utilizando o formalismo PPN [11, 12].

Obtivemos que há uma degenerescência entre os parâmetros Y_1 e Y_2 das teorias *Beyond Horndeski*. Não é possível medi-los separadamente com os dados que possuímos [13], que utilizam a combinação do efeito de lenteamento gravitacional com a dinâmica estelar, pois estes dados possuem uma limitação para determinar melhor o perfil de densidade de massa da lente. Existem dados que combinam dinâmica e lentes gravitacionais que são muito mais detalhados do que estes [14, 15]. Com esses dados mais detalhados,

é possível que haja chances de determinar os parâmetros Y_1 e Y_2 separadamente.

Sobre a autora

Fernanda Araujo de Oliveira é bacharel em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2020), licenciada em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (2023), mestre em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas na área de Cosmologia (2022), com foco em lentes gravitacionais, e doutoranda em Astronomia do Observatório Nacional na área de Cosmologia, com foco no estudo do crescimento de estruturas em modelos alternativos.

Referências

- [1] Y. Akrami et al., *Planck 2018 results. VII. Isotropy and Statistics of the CMB*, *Astron. Astrophys.* **641**, A7 (2020). [ArXiv:1906.02552](#).
- [2] F. Avila et al., *The angular scale of homogeneity in the Local Universe with the SDSS blue galaxies*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **488**(1), 1481 (2019). [ArXiv:1906.10744](#).
- [3] E. Berti et al., *Testing General Relativity with Present and Future Astrophysical Observations*, *Class. Quant. Grav.* **32**, 243001 (2015). [ArXiv:1501.07274](#).
- [4] J. Gleyzes et al., *Healthy theories beyond Horndeski*, *Phys. Rev. Lett.* **114**(21), 211101 (2015). [ArXiv:1404.6495](#).
- [5] M. Li et al., *Dark Energy*, *Commun. Theor. Phys.* **56**, 525 (2011). [ArXiv:1103.5870](#).
- [6] M. Makler, *Lentes gravitacionais: um rico recurso didático na ocasião da celebração dos 100 anos do eclipse de Sobral*, *Conexões Ciência e Tecnologia* **13**(2), p.21 (2019).
- [7] B. Jain e J. Khoury, *Cosmological Tests of Gravity*, *Annals Phys.* **325**, 1479 (2010). [ArXiv:1004.3294](#).
- [8] E. Bertschinger, *One Gravitational Potential or Two? Forecasts and Tests*, *Phil. Trans. Roy.*

- Soc. Lond. A **369**, 4947 (2011). [ArXiv:1111.4659](#).
- [9] J. D. Toniato e D. C. Rodrigues, *Post-Newtonian γ -like parameters and the gravitational slip in scalar-tensor and $f(R)$ theories*, [Phys. Rev. D **104**\(4\), 044020 \(2021\)](#). [ArXiv:2106.12542](#).
- [10] J. Sakstein et al., *Testing Gravity Using Galaxy Clusters: New Constraints on Beyond Horndeski Theories*, [JCAP **07**, 019 \(2016\)](#). [ArXiv:1603.06368](#).
- [11] S. Cao et al., *Test of parametrized post-Newtonian gravity with galaxy-scale strong lensing systems*, [Astrophys. J. **835**\(1\), 92 \(2017\)](#). [ArXiv:1701.00357](#).
- [12] J. Schwab, A. S. Bolton e S. A. Rappaport, *Galaxy-scale strong-lensing tests of gravity and geometric cosmology: constraints and systematic limitations*, [The Astrophysical Journal **708**\(1\), 750 \(2009\)](#).
- [13] S. Cao et al., *Cosmology With Strong-lensing Systems*, [Astrophys. J. **806**, 185 \(2015\)](#). [ArXiv:1509.07649](#).
- [14] T. E. Collett et al., *A precise extragalactic test of General Relativity*, [Science **360**, 1342 \(2018\)](#). [ArXiv:1806.08300](#).
- [15] G. B. Caminha et al., *Strong lensing models of eight CLASH clusters from extensive spectroscopy: accurate total mass reconstructions in the cores*, [Astron. Astrophys. **632**, A36 \(2019\)](#). [ArXiv:1903.05103](#).

Propriedades estelares de galáxias compactas massivas no Universo Local

K. Slodkowski Clerici¹, A. Schnorr-Müller¹, M. Trevisan¹ e T. V. Ricci²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul

²Universidade Federal da Fronteira Sul

Resumo

As galáxias compactas massivas (MCGs) são galáxias quiescentes caracterizadas, neste trabalho, com altos valores de dispersão de velocidades efetiva, massa estelar e pequenos valores de raio efetivo. Com o objetivo de investigar a formação e evolução das MCGs, nós determinamos as propriedades das populações estelares de 1858 MCGs derivadas do levantamento *Sloan Digital Sky Survey*. Comparamos os resultados com uma amostra de galáxias controle (CSGs) (galáxias quiescentes com tamanhos médios) pareada em *redshift* com as MCGs. Comparamos os resultados à dispersão de velocidades fixa e encontramos diferenças entre as propriedades das populações estelares, especialmente para a metalicidade estelar: MCGs apresentam menor metalicidade que CSGs à dispersão de velocidades fixa. Os resultados apresentados ainda não são suficientes para determinar o caminho evolutivo das MCGs, mas podem indicar diferenças associadas à função de massa inicial ou da fração de matéria escura dentro de 1 raio efetivo nas MCGs.

Abstract

Massive compact galaxies (MCGs) are quiescent galaxies characterized, in this work, with high values of effective velocity dispersion, stellar mass and small values of effective radius. With the aim of investigating the formation and evolution of MCGs, we determined the properties of the stellar populations of 1858 MCGs derived from the *Sloan Digital Sky Survey*. We compare the results with a sample of control galaxies (CSGs) (quiescent galaxies with medium sizes) matched in redshift to the MCGs. We compared the results to the fixed velocity dispersion and found differences between the properties of the stellar populations, especially for stellar metallicity: MCGs present lower metallicity than CSGs at the fixed velocity dispersion. The results presented are not yet sufficient to determine the evolutionary path of MCGs, but may indicate differences associated with the initial mass function or the fraction of dark matter within 1 effective radius in MCGs.

Palavras-chave: astrofísica, galáxia, matéria escura

Keywords: astrophysics, galaxy, dark matter

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44989](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44989)

1 Introdução

De acordo com a formação estelar, galáxias em $z \approx 0$ podem ser classificadas como galáxias de formação estelar ativa e galáxias quiescentes. Os dois grupos de galáxias, por exemplo, diferem na intensidade da formação estelar, galáxias quiescentes possuem pouco gás e formam poucas quantidades de estrelas quando comparadas com galáxias de formação estelar ativa. Ademais, galáxias quiescentes são caracterizadas por populações estelares velhas e mais metálicas [1]. Essa classificação também está presente em *redshifts* mais altos. A primeira galáxia quiescente observada foi em $z \approx 4$ e atualmente, com o telescópio espacial James Webb, galáxias quiescen-

tes estão sendo observadas em *redshifts* ainda mais distantes.

No entanto, galáxias com mesma massa estelar em diferentes *redshifts* apresentam propriedades diferentes. Por exemplo, galáxias em alto *redshifts* ($z \approx 2$) são extremamente compactas quando comparadas com galáxias em $z \approx 0$ [2]. Além disso, galáxias compactas também são raras em $z \approx 0$ [2], indicando uma mudança estrutural nas galáxias quiescentes ao longo do tempo.

Os processos de formação e evolução de galáxias quiescentes e mais especificamente de galáxias compactas ainda são investigados. Cenários propostos indicam que eventos restritos à *redshifts* mais altos

tornam as galáxias compactas e que processos como *dry minor mergers* são os principais responsáveis pelo crescimento das galáxias quiescentes ao longo do tempo [3, 4]. Também é importante considerar o efeito de *progenitor bias*: galáxias de formação estelar ativa crescem ao longo do tempo e podem evoluir para galáxias quiescentes contribuindo para as propriedades médias desse grupo de galáxias. Entretanto, investigar em detalhe grandes amostras de galáxias compactas em altos *redshifts* é desafiador com as instalações atuais devido ao tamanho e ao fraco contínuo estelar das galáxias. Uma alternativa é buscar por análogos locais.

Neste trabalho, apresentamos uma amostra de galáxias compactas selecionadas em $z \approx 0$, determinamos as propriedades das populações estelares e comparamos os resultados com galáxias quiescentes típicas com o objetivo de investigar os processos de formação e evolução de galáxias compactas.

2 Metodologia

Para a seleção da amostra usamos o levantamento *Sloan Digital Sky Survey Data Release 14* (SDSS - DR 14) [5]. A partir da massa estelar (M_*) e taxa de formação estelar específica (sSFR), selecionamos galáxias quiescentes com $\log(M_*/M_\odot) \geq 10$ e $\text{sSFR} \leq 10^{-11} \text{yr}^{-1}$. Para selecionar as galáxias compactas massivas, nós aplicamos um ajuste linear nos planos dispersão de velocidades efetiva (σ_e) - raio efetivo (R_e) e $\sigma_e - M_*$ das galáxias quiescentes do SDSS e definimos as MCGs como galáxias que estão simultaneamente a 2σ abaixo da relação $\sigma_e - R_e$ e a 2σ acima da relação $\sigma_e - M_*$. Para finalizar, nós também restringimos a amostra em *redshifts* ($z < 0.1$). A amostra final possui 1858 MCGs.

Para investigar as propriedades das populações estelares das MCGs e comparar com galáxias quiescentes típicas em $z \approx 0$, nós construímos uma amostra de controle (CSGs) selecionando galáxias quiescentes dentro de $\pm 1\sigma$ dos ajustes de $\sigma_e - R_e$ e 2σ e $\sigma_e - M_*$. Selecionamos 5574 CSGs com *redshifts* similar as das MCGs.

Nós medimos as propriedades das populações estelares (idade, metalicidade e $[\alpha/\text{Fe}]$) em ambas as amostras. Para estimar a idade e metalicidade nós aplicamos o código *penalized pixel fitting* ppxf [6] com os modelos de V15 [7]. Usamos os modelos com idades variando entre 30 Myr e 13.5 Gyr, metalicida-

des entre $[\text{M}/\text{H}] = -1.3$ e $+0.4$ e $[\alpha/\text{Fe}] = \text{BaseFe}$ (modelos que assumem abundância solar para os elementos α). As galáxias foram ajustadas no regime de $3900 - 5800 \text{ \AA}$ para evitar a região que possui linhas de absorção muito sensíveis à função de massa inicial. Por fim, estimamos a idade e a metalicidade pesada pela massa estelar.

Nós usamos a metodologia de Schnorr-Müller et al. (2021) [8] para determinar $[\alpha/\text{Fe}]$, ou seja, medimos os índices Fe 4383, Fe 5270, Fe 5335 e Mgb, calculamos as metalicidades associadas as linhas de ferro e magnésio e determinamos $[\alpha/\text{Fe}]$ usando a equação proposta por Trevisan et al. (2017) [9]. Os resultados são apresentados na próxima seção.

3 Resultados

Nós comparamos as propriedades das populações estelares entre MCGs e CSGs à σ_e fixo. Isso porque, para as galáxias quiescentes a propriedade que melhor se correlaciona com as propriedades das populações estelares é a dispersão de velocidade. De forma geral, galáxias quiescentes com maiores valores de dispersão de velocidade são mais velhas, mais metálicas e possuem maiores valores de $[\alpha/\text{Fe}]$ [1]. Portanto, para comparar as propriedades das populações estelares, nós separamos MCGs e CSGs em 3 bins de σ_e : $< 200 \text{ km/s}$; $200 - 225 \text{ km/s}$; $> 225 \text{ km/s}$; como apresentado na Fig. 1. Nas linhas da Fig. são apresentados as propriedades das populações estelares (painéis superiores: idade; painéis do meio: metalicidade estelar; e painéis inferiores: $[\alpha/\text{Fe}]$), as colunas apresentam os bins de σ_e (painéis da esquerda: $< 200 \text{ km/s}$, painéis do meio: $200 - 225 \text{ km/s}$; painéis da direita: $> 225 \text{ km/s}$).

Os resultados indicam diferenças nas propriedades das populações estelares entre as duas amostras. Para $\sigma_e < 225 \text{ km/s}$ MCGs são mais velhas e possuem valores mais altos de $[\alpha/\text{Fe}]$ do que CSGs à σ_e fixo, porém a diferença entre essas propriedades em alto σ_e ($\sigma_e > 225 \text{ km/s}$) se torna marginal, como indicado pelo *p-value* Kolmogorov-Smirnov teste. Comparando a metalicidade estelar, observamos que MCGs apresentam metalicidades menores que CSGs à σ_e fixo em todo o intervalo de σ_e .

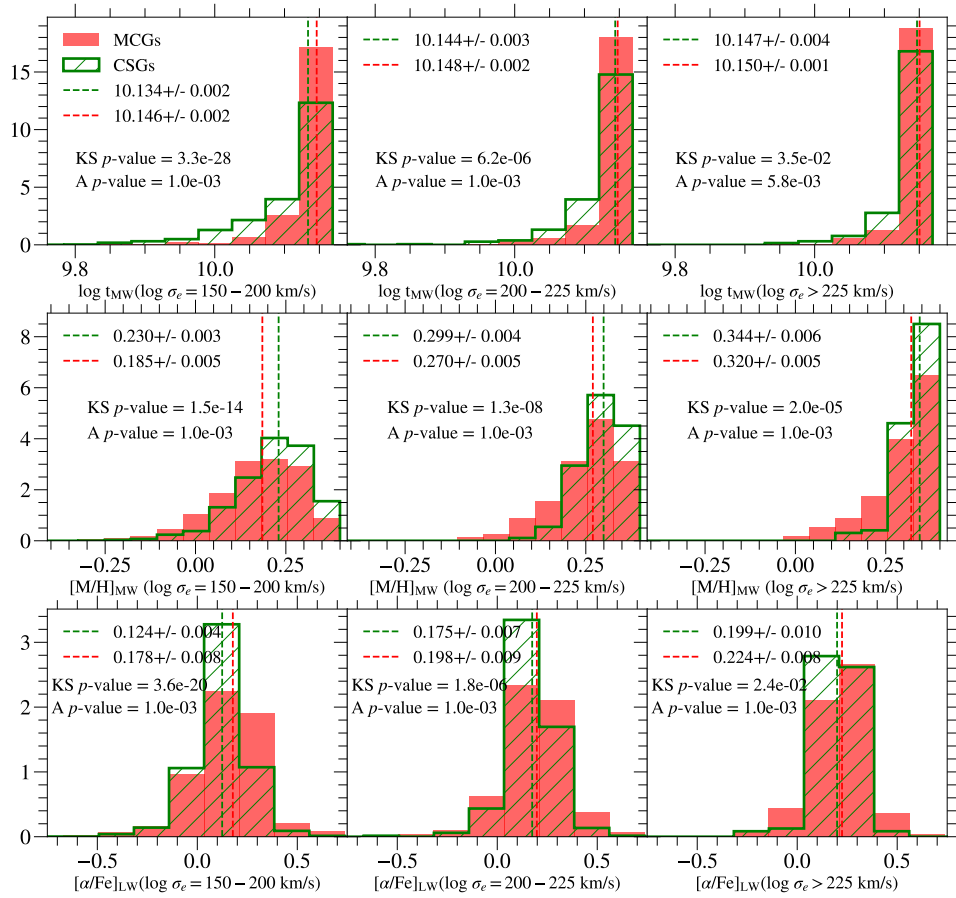


Figura 1: Distribuição das propriedades das populações estelares em bins de σ_e : < 200 km/s (coluna da esquerda); $200 - 225$ km/s (coluna do meio); > 225 km/s (coluna da direita). Na linha superior é apresentada a idade pesada por M_* , linha do meio a metalicidade estelar pesada por M_* e na linha inferior $[\alpha/Fe]$ pesado por luz. As MCGs são representadas em vermelho e as CSGs em verde e as linhas tracejadas representam a mediana das distribuições. KS p -value retorna a p -value do teste Kolmogorov–Smirnov e A p -value retorna a p -value do teste Anderson-Darling.

4 Discussão dos resultados e conclusões

Nós definimos um novo critério baseado na M_* , R_e e σ_e para selecionar galáxias compactas massivas em $z \approx 0$ com o objetivo de buscar análogos locais de galáxias compactas quiescentes em *redshifts* mais altos. Os critérios de seleção, especialmente os altos valores de σ_e , permitiram recuperar galáxias compactas majoritariamente velhas como mostram os resultados apresentados por Schnorr-Müller et al. (2021) [8]. Além disso, buscamos investigar também galáxias compactas massivas com $M_*/M_\odot \approx 10$, uma vez que é um regime de M_* pouco explorado na literatura.

Diante das diferenças encontradas nas propriedades das populações estelares, bem como a grande diferença da M_* (CSGs possuem M_* maior que ≈ 0.7 dex que M_* das MCGs), nós sugerimos que CSGs e

MCGs são descendentes de diferentes populações de galáxias quiescentes em alto *redshifts* ($z \approx 2$).

Por fim, os resultados encontrados para as propriedades das populações estelares ainda não são suficientes para descrever o caminho de formação e evolução de galáxias compactas massivas. No entanto, os resultados sugerem que podem existir diferenças na função de massa inicial ou ainda da fração de matéria escura dentro de $1 R_e$ de MCGs quando comparado com galáxias quiescentes típicas, como discutido por Graves & Faber (2010) [10].

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior-CAPES e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico-CNPq pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste trabalho.

Sobre as autoras

Katia Slodkowski Clerici (katia.clerici@ufrgs.br) possui graduação em Física-licenciatura pela Universidade Federal da Fronteira Sul, mestrado em Física pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC e atualmente é doutoranda em Astrofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em evolução de galáxias.

Marina Trevisan possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo, mestrado em Astrofísica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e doutorado em Astrofísica pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (2012). Realizou estágios de pós-doutorado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Brasil) e no Institut d'Astrophysique de Paris (França). Atualmente é Professora Adjunta na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É diretora do Observatório Astronômico da UFRGS e secretária-geral da atual diretoria da Sociedade Astronômica Brasileira. Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Astronomia Extragaláctica, Populações Estelares e Astrofísica Estelar.

Sobre os autores

Allan Schnorr Müller possui graduação, mestrado e doutorado em Física (Astrofísica) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Realizou estágios de pós-doutorado no Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik e na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente é professor adjunto na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de Astrofísica/Astronomia Extragaláctica, em especial evolução de galáxias e galáxias com núcleos ativos.

Tiago Vecchi Ricci possui graduação em Física pelo Instituto de Física da Universidade de São Paulo, mestre em Astronomia pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP e doutor em Astronomia pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Atualmente,

é professor adjunto III na Universidade Federal da Fronteira Sul, campus Cerro Largo. Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Núcleos Ativos de Galáxias de Baixa Luminosidade utilizando dados de espectroscopia de campo integral.

Referências

- [1] D. Thomas et al., *The Epochs of Early-Type Galaxy Formation as a Function of Environment*, *Astrophysical Journal* **621**(2), 673 (2005). [ArXiv:astro-ph/0410209](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0410209).
- [2] A. van der Wel et al., *3D-HST+CANDELS: The Evolution of the Galaxy Size-Mass Distribution since $z = 3$* , *Astrophysical Journal* **788**(1), 28 (2014). [ArXiv:1404.2844](https://arxiv.org/abs/1404.2844).
- [3] T. Naab, P. H. Johansson e J. P. Ostriker, *Minor Mergers and the Size Evolution of Elliptical Galaxies*, *Astrophysical Journal Letters* **699**(2), L178 (2009). [ArXiv:0903.1636](https://arxiv.org/abs/0903.1636).
- [4] P. G. van Dokkum, K. E. Whitaker e et al., *The Growth of Massive Galaxies Since $z = 2$* , *Astrophysical Journal* **709**(2), 1018 (2010). [ArXiv:0912.0514](https://arxiv.org/abs/0912.0514).
- [5] B. Abolfathi et al., *The Fourteenth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey: First Spectroscopic Data from the Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey and from the Second Phase of the Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment*, *Astrophysical Journal Supplement* **235**(2), 42 (2018). [ArXiv:1707.09322](https://arxiv.org/abs/1707.09322).
- [6] M. Cappellari, *Structure and kinematics of early-type galaxies from integral field spectroscopy*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **54**, 597 (2016). [ArXiv:1602.04267](https://arxiv.org/abs/1602.04267).
- [7] A. Vazdekis et al., *Evolutionary stellar population synthesis with MILES - II. Scaled-solar and α -enhanced models*, *Monthly Notices of the RAS* **449**(2), 1177 (2015). [ArXiv:1504.08032](https://arxiv.org/abs/1504.08032).
- [8] A. Schnorr-Müller et al., *The puzzling origin of massive compact galaxies in MaNGA*, *Monthly Notices of the RAS* **507**(1), 300 (2021). [ArXiv:2104.12737](https://arxiv.org/abs/2104.12737).

- [9] M. Trevisan, G. A. Mamon e H. G. Khoshroshahi, *Do the stellar populations of the brightest two group galaxies depend on the magnitude gap?*, *Monthly Notices of the RAS* **464**(4), 4593 (2017). [ArXiv:1604.07726](#).
- [10] G. J. Graves e S. M. Faber, *Dissecting the red sequence. III. Mass-to-light variations in three-dimensional fundamental plane space*, *Astrophysical Journal* **717**(2), 803 (2010). [ArXiv:1005.0014](#).

Medidas de linhas de emissão com aprendizado de máquina

Lis Cristine Fortes e Natalia Vale Asari

Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

Transições eletrônicas em íons de nebulosas presentes em galáxias emitem fótons com energias características, despontando dos espectros das galáxias como linhas de emissão. Medidas dos fluxos de linhas de emissão são fundamentais no entendimento deste sistema físico. Por exemplo, a largura equivalente da linha espectral nebulosa $H\alpha$ está ligada à taxa de formação estelar específica de uma galáxia e é também útil para quantificar a presença do gás difuso ionizado em galáxias. Dado que na astrofísica trabalha-se com cubos que contêm milhares de espectros por galáxia, é importante avaliar o método utilizado para extrair as propriedades físicas dos dados, haja vista a grande demanda computacional envolvida. Para tanto, a proposta deste trabalho consistiu na aplicação de uma rede neural convolucional para medir amplitude e fluxo obtidos de linhas de emissão $H\alpha$ geradas a partir de uma função gaussiana. Os resultados apresentam-se promissores e o aprendizado eficiente. A perspectiva é aplicar o método para dados do MUSE (*Multi Unit Spectroscopic Explorer*).

Abstract

Electronic transitions in nebula ions present in galaxies emit photons with characteristic energies, emerging from the spectra of galaxies as emission lines. Measurements of emission line fluxes are fundamental in understanding this physical system. For example, the equivalent width of the nebular spectral line $H\alpha$ is linked to the specific star formation rate of a galaxy and is also useful for quantifying the presence of ionized diffuse gas in galaxies. Given that in astrophysics we work with cubes that contain thousands of spectra per galaxy, it is important to evaluate the method used to extract the physical properties of the data, given the great computational demand involved. To this end, the proposal of this work consisted of applying a convolutional neural network to measure amplitude and flux obtained from $H\alpha$ emission lines generated from a Gaussian function. The results are promising and the learning is efficient. The perspective is to apply the method to data from MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer).

Palavras-chave: aprendizado de máquina, astrofísica, galáxias

Keywords: machine learning, astrophysics, galaxies

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44988](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44988)

1 Introdução

Hoje em dia, na astrofísica, é possível trabalhar com cubos de dados que possuem milhares de espectros para cada galáxia. Mas, há cerca de duas décadas, o surgimento das grandes bases de dados, como a do Sloan Digital Sky Survey (SDSS)¹, tornou necessário o desenvolvimento de ferramentas automáticas para extrair as propriedades físicas dos dados. Atualmente, essas ferramentas estão começando a precisar de reavaliação. Por exemplo, um cubo de dados do *Multi Unit Spectroscopic Explorer* (MUSE [1]), em um *cluster* com 32 nós, demanda um dia de

processamento. Portanto, é necessário reavaliar os métodos utilizados para obter as informações físicas dos cubos.

Assim, o objetivo desse estudo foi analisar a viabilidade do aprendizado de máquina para obter propriedades físicas de cubos de dados de forma mais rápida. Para tanto, foi efetuada a exploração de um método de aprendizado de máquina, que se comprovou acurado [2] quando aplicado a dados obtidos com o instrumento *Spectromètre Imageur à Transformée de Fourier pour l'Étude en Long et en Large de raies d'Émission* (SI-TELLE).

¹<https://www.sdss.org/>

1.1 Linhas de emissão

As linhas de emissão são um incremento no fluxo em um determinado comprimento de onda e são originadas a partir da sobreposição de grande quantidade de fótons gerados quando elétrons passam por transições em que saem de um estado de maior energia para um estado de menor energia [3]. A energia de cada fóton terá o mesmo valor que a queda na energia do elétron ao efetuar a transição. É possível quantificar esse valor a partir da equação de Planck–Einstein:

$$\Delta E = h\nu. \quad (1)$$

A quantificação do fluxo das linhas de emissão torna possível obter diversas propriedades físicas de galáxias. Por exemplo, a largura equivalente da linha espectral nebular $H\alpha$ está ligada à taxa de formação estelar de uma galáxia e também à quantidade de gás difuso ionizado nela; a razão entre as luminosidades das linhas $H\alpha$ e $H\beta$ é indicativo da atenuação por poeira; e, ainda, a densidade superficial da luminosidade de $H\alpha$ está ligada à massa de gás ionizado.

Através deste estudo, pretende-se, futuramente, quantificar o fluxo de linhas de emissão a partir de informações extraídas de cubos de dados de galáxias.

1.2 O aprendizado de máquina supervisionado e a rede neural convolucional

O aprendizado de máquina supervisionado é um método no qual os dados inseridos para treinamento (dados de entrada) são rotulados e a máquina aprende a identificá-los, conseguindo generalizar o que aprendeu e aplicar para novos dados. Ele difere do aprendizado não supervisionado porque neste último não há rótulos.

A rede neural artificial é um método que pode ser construído basicamente de camadas de neurônios artificiais; a camada de entrada consiste nos dados inseridos. As camadas ocultas seguintes são compostas de neurônios que obtêm pesos e vieses para a saída da camada anterior, e que calculam valores de entrada para a camada seguinte. Por fim, existe uma camada de saída, consistindo nos resultados obtidos [4].

A rede neural convolucional que compõe o conjunto de ferramentas Pamplemousse [2] é uma

adaptação da rede neural convolucional StarNet [4]. A diferença entre a rede neural convolucional e a artificial é que uma utiliza a função de convolução e a outra não. Esta rede neural convolucional consiste em uma combinação de camadas convolucionais e camadas totalmente conectadas. Nas camadas convolucionais, filtros são aplicados para extrair informações locais da camada anterior. Desta forma, a rede aprende quais filtros ativar quando encontra determinadas características, criando mapas de características. Em uma segunda camada convolucional, que imediatamente sucede a primeira camada convolucional, ocorre a convolução do mapa de características da camada anterior, permitindo o aprendizado de recursos de ordem superior. Já as camadas totalmente conectadas computam várias combinações lineares dos valores de entrada, com objetivo de produzir um vetor de saída [4]. Assim, explorando o trabalho de C. Rhea et al., 2020 [2], os dados de entrada foram linhas $H\alpha$ simuladas e a saída foram as estimativas da amplitude e do fluxo destas linhas.

2 Método

Esta investigação consistiu em avaliar o desempenho da rede neural convolucional² estudada, para obter valores de amplitude e fluxo da linha de emissão $H\alpha$ com formato gaussiano.

3 Dados de entrada

Inicialmente, foi elaborada uma função gaussiana, G , para gerar linhas de emissão $H\alpha$. Os parâmetros da função foram a velocidade do centro da linha v_0 , a amplitude A , a velocidade v , a dispersão intrínseca, que é a dispersão das velocidades dos íons H^+ na nebulosa (que chamamos de dispersão de velocidade) σ , a dispersão instrumental σ_i ; as duas últimas se somam em quadratura, resultando na dispersão de velocidade observada σ_{obs} . Além disso, v é calculada, considerando-se velocidades baixas, utilizando o comprimento de onda de repouso, (λ_0), o comprimento de onda, λ , e a velocidade da luz, c .

Desta forma, foram utilizadas as seguintes equações:

²<https://github.com/sitelle-signals/Pamplemousse>

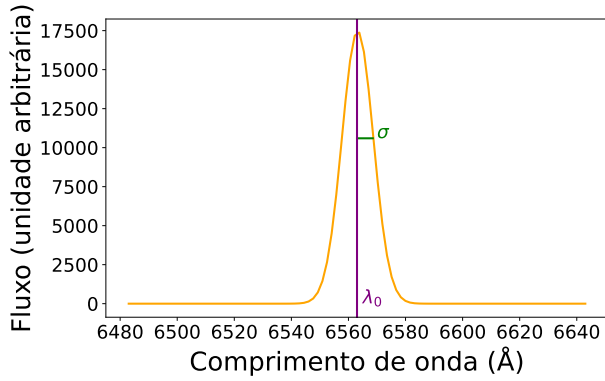


Figura 1: Espectro gerado com a equação 2. Em verde está destacado o desvio padrão da distribuição, e em roxo o comprimento de onda central, λ_0 . Para os treinamentos efetuados, como utilizamos a dispersão instrumental, σ_i , igual a zero, o desvio padrão corresponde à dispersão de velocidade, σ_{obs} , conforme pode ser visto na equação 4.

$$G = Ae^{(v-v_0)^2/2\sigma_{\text{obs}}^2}, \quad (2)$$

em que

$$v = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} c \quad (3)$$

e

$$\sigma_{\text{obs}} = \sqrt{\sigma^2 + \sigma_i^2}. \quad (4)$$

A integral da equação 2 resulta no fluxo integrado:

$$f = A\sigma_{\text{obs}}\sqrt{2\pi}. \quad (5)$$

Os espectros foram gerados na faixa de comprimentos de onda entre 6483 e 6643 Å, com 100 pontos de igual espaçamento. O valor da c usado foi 2.998×10^5 km/s e o λ_0 foi fixado em 6563 Å. Foi adicionado ruído com formato gaussiano, cujo desvio padrão foi 0,001 e a média nula.

Foram gerados 100 valores igualmente espaçados de A na faixa de 1 a 10^7 em unidade arbitrária e 100 valores igualmente espaçados de σ de 10 a 500 km/s. Esses valores foram combinados para que fossem geradas 10000 gaussianas. O valor de v_0 foi fixado em 10 km/s e o valor de σ_i foi nulo.

Na Figura 1, é apresentado um espectro gerado com a equação 2. Em roxo é apresentado o valor central da distribuição, que representa o λ_0 do sistema. Em verde está indicada a σ_{obs} .

4 Aprendizado da rede neural convolucional

Os espectros obtidos foram utilizados para as etapas de treinamento, validação e teste da rede. Para o treinamento, foram utilizados 70% dos espectros, totalizando 7000. Para validação, 20%, totalizando 2000 e para teste, 10%, totalizando 1000 espectros. Como resultado para a etapa de teste, foram obtidas as Figuras 2 e 3. O resíduo apresentado na coordenada vertical da Figura 2, R_A , é definido como o módulo da diferença entre a amplitude obtida pela rede A_r e a amplitude esperada, A :

$$R_A = |A_r - A|. \quad (6)$$

O mesmo ocorre para o resíduo apresentado na coordenada vertical da Figura 3, R_f , ele é o resultado do módulo da diferença entre o fluxo obtido pela rede, f_r , e o fluxo esperado, f :

$$R_f = |f_r - f|. \quad (7)$$

Na Figura 2 há três linhas sobrepondo os dados: uma indicando a relação de mesma ordem de grandeza entre o R_A e a A , a outra, tracejada, indicando onde o R_A é 10% de A e a última, pontilhada, indicando onde o R_A é 1% de A . Da mesma forma, na Figura 3, há quatro linhas estabelecendo relações entre o R_f e o f : as três primeiras têm a mesma relação que foi descrita para a Figura 2, e a última estabelece onde o R_f é 0,1% do f .

Assim, é possível perceber que para o teste de amplitude, constante na Figura 2, o R_A possui ordem de grandeza próximo de 10% do valor de A , em que a maioria dos dados encontra-se acima deste fator. Há alguns pontos em que R_A está entre 10 e 1% de A . Poucos são os valores em que R_A e A possuem mesma ordem de grandeza; nota-se o mesmo para a faixa em que R_A é menor do que 1% de A . Os dados apresentados indicam o bom treinamento da rede.

Já para teste de fluxo, Figura 3, é possível ver que, para valores de f até 10^3 , R_f possui ordem de grandeza superior ao f , indicando que o treinamento não foi eficiente neste intervalo. Para valores maiores, o R_f é reduzido, chegando a cerca de 1% do valor do f no entorno de 10^5 e após, permeia valores entre 1 e 0,1% do f , indicando o bom treinamento da rede.

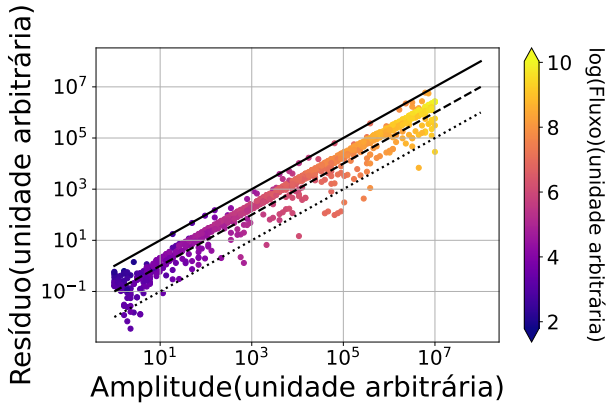


Figura 2: Resíduo da amplitude, R_A , em função da amplitude, A . A linha superior indica onde o R_A tem a mesma ordem de grandeza da A , a linha tracejada, onde R_A é 10% da A e a linha pontilhada, onde ele é 1% da A . Percebe-se que, para a maioria dos pontos o R_A está em torno de 10% da A .

Os resultados são interessantes para futuras análises em galáxias do MUSE, que apresentam ordem de grandeza do fluxo de $H\alpha$ variando de 0 a 10^6 em unidades de $10^{-20} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{\AA}^{-1}$.

5 Conclusão

Através do trabalho efetuado, pôde-se vislumbrar a possível aplicação desta rede neural convolucional para futuras análises em dados observacionais de galáxias do MUSE, apresentando-se como uma alternativa para superar a demanda de tempo de processamento dos dados; esta informação já foi apontada por outros autores [2], no contexto de aplicação aos dados do SITELLE. Os resultados do treinamento apresentaram-se promissores, sendo que os resíduos, R_A e R_f , apresentam-se em maioria no entorno de 10% da amplitude e entre 0,1 e 1% do fluxo, respectivamente. Pondera-se que ainda é necessário, no futuro, avaliar o desempenho da rede neural convolucional para espectros semelhantes aos dos dados observacionais.

Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro concedido.

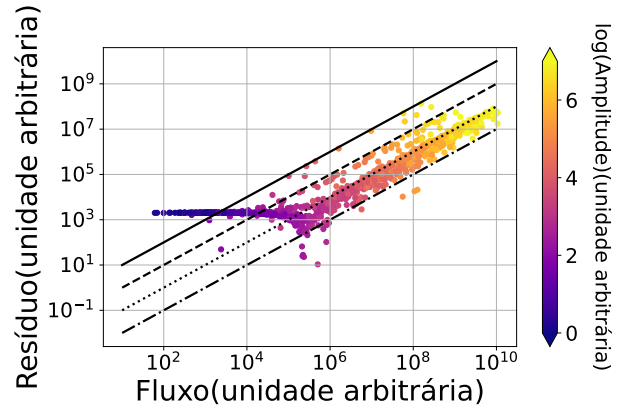


Figura 3: Resíduo do fluxo, R_f , em função do fluxo, f . A linha superior indica onde o R_f tem a mesma ordem de grandeza do f , a linha tracejada, onde R_f é 10% do f , a linha pontilhada, onde ele é 1% do f , e a linha pontilhada-tracejada, onde ele é 0,1% do f . Percebe-se que, para a maioria dos pontos, o R_f permeia o intervalo entre 0,1 e 1% do f .

Sobre as autoras

Lis Cristine Fortes é técnica em Agroindústria pelo IFSC, instituição onde começou sua formação como pesquisadora, atuando na área de Ciência e Tecnologia de Alimentos. Atualmente é graduanda em Física na UFSC. Desde 2021 pesquisa na área de Astrofísica Extragaláctica. Também possui experiência na área de Materiais Nanoestruturados.

Natalia Vale Asari é professora no Departamento de Física da UFSC desde 2014 e subcoordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física da UFSC desde 2021. Recebeu o Prêmio Carolina Nemes da Sociedade Brasileira de Física em 2019. Sua pesquisa, em colaboração com colegas na França, México, Polônia e Escócia, é voltada para populações estelares e abundâncias químicas de galáxias.

Referências

- [1] R. Bacon et al., *The MUSE second-generation VLT instrument*, in *Ground-based and air-borne instrumentation for Astronomy III*, editado por I. S. McLean, S. K. Ramsay e H. Takami (2010), vol. 7735 de *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*

- (*SPIE*) *Conference Series*, 773508. [ArXiv:2211.16795](#).
- [2] C. Rhea et al., *A machine-learning approach to integral field unit spectroscopy observations. I. H ii region kinematics*, *Astrophysical Journal* **901**(2), 152 (2020). [ArXiv:2008.08093](#).
- [3] B. Ryden e B. M. Peterson, *Foundations of astrophysics* (Addison-Wesley, 2010).
- [4] S. Fabbro et al., *An application of deep learning in the analysis of stellar spectra*, *Monthly Notices of the RAS* **475**(3), 2978 (2018). [ArXiv:1709.09182](#).

O gás difuso ionizado: modelos de fotoionização

M. E. Ramos Pedro e N. Vale Asari

Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

Neste projeto, investigamos as altas taxas de ionização observadas no gás difuso de galáxias por meio de modelos de fotoionização. Para isso, construímos nove modelos simples com o código *Cloudy* que nos permitiram compreender os primeiros conceitos sobre ionização de nebulosas.

Abstract

In this project, we investigate the high ionization rates observed in the diffuse gas of galaxies using photoionization models. To do this, we built nine simple models with the *Cloudy* code that allowed us to understand the first concepts about nebula ionization.

Palavras-chave: astrofísica, fotoionização, gás difuso

Keywords: astrophysics, photoionization, diffuse gas

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44985](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44985)

1 Introdução

Em galáxias espirais, além das regiões H II [1], com temperaturas de 10,000 K e densidades de $1,0$ a 10^2 partículas cm^{-3} , também existe um gás menos denso, o gás difuso ionizado (DIG, do inglês *diffuse ionized gas*). Localizado no halo e no meio interestelar, e distante das principais fontes de ionização de uma galáxia, como estrelas quentes e jovens, o DIG [2] tem temperatura próxima a 10,000 K e densidade de cerca de $0,1$ partículas cm^{-3} .

A alta taxa de ionização neste gás instiga discussões acerca das fontes de ionização necessárias para a formação das linhas espectrais observadas no DIG [3]. Já existem alguns candidatos – choques, raios cósmicos ou emissões fotoelétricas por grãos –, mas que não são suficientes para solucionar este enigma. Por isso, suspeita-se da contribuição de uma classe de estrelas: as estrelas quentes de baixa massa [4], ou HOLMES (*Hot Low-Mass Evolved Stars*), localizadas nos discos, bojos e halos das galáxias, em regiões comuns à presença do DIG.

O DIG é uma peça fundamental para entender a composição química do gás das galáxias, e que, por sua vez, nos permite estudar a evolução dos elementos químicos em galáxias – provenientes da reciclagem de elementos químicos formados por nucleossíntese estelar. O estudo do DIG envolve técnicas de

simulação e observação, a partir da comparação de modelos com dados espectrais de galáxias. Nas simulações, utilizamos modelos de fotoionização, que permitem simular diversos parâmetros em uma nuvem de gás e poeira (nebulosa). Nesta etapa, o objetivo foi construir nove modelos de fotoionização simples para investigar a contribuição de diferentes estrelas, assim como as HOLMES, na ionização do DIG.

2 Desenvolvimento

Existem diferentes códigos para criar modelos de fotoionização. Neste trabalho, usamos o código de fotoionização *Cloudy* [5] e a biblioteca do Python *py-Cloudy* [6]. Nos modelos aqui configurados, montamos nebulosas a partir de quatro informações de entrada:

1. Temperatura do corpo negro (T): temperatura da fonte ionizante no centro da nuvem (que arrancará elétrons dos átomos ou íons da nebulosa);
2. Luminosidade, ou taxa de emissão de fótons capazes de ionizar o hidrogênio ($q(\text{H})$);
3. Densidade do hidrogênio (H_{den}): soma das densidades do elemento em todas as suas formas: iônica (H^+), neutra (H^0) ou molecular (H_2);

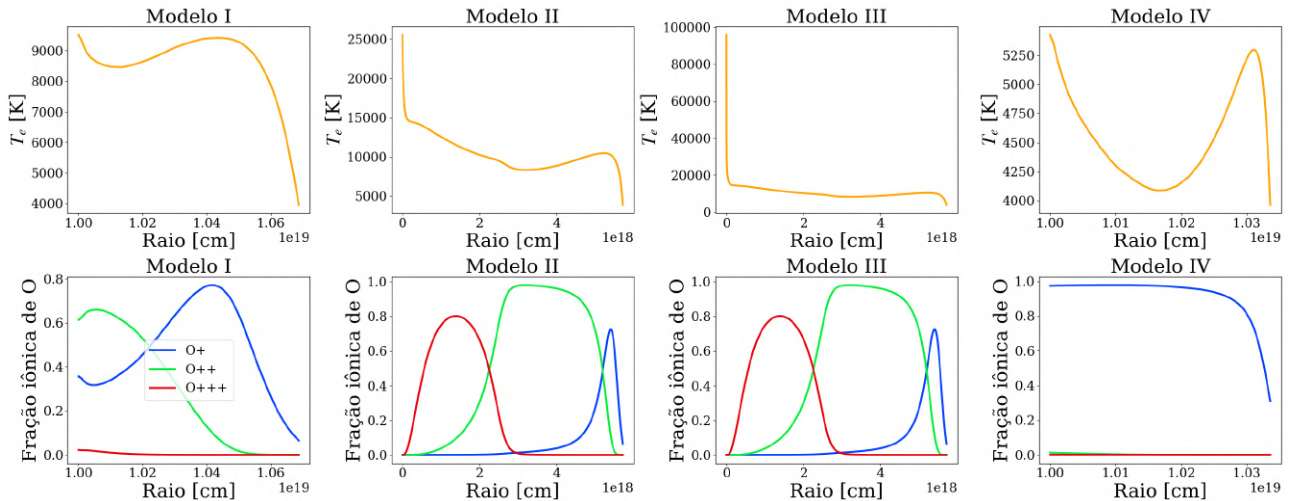


Figura 1: Temperatura eletrônica e fração iônica do oxigênio em função do raio, para quatro dos oito modelos de nebulosas. Os gráficos correspondem verticalmente aos mesmos modelos. As configurações dos modelos estão de acordo com o mostrado na Tabela 1.

4. Raio da nebulosa: deve possuir dimensão interna e externa (r_{out} e r_{in}), considerando uma geometria esférica.

Os dados de saída do *Cloudy* nos permitem entender o comportamento físico da nebulosa resultante.

3 Resultados

Criamos nove modelos de nebulosas, variando seu raio interno e as temperaturas de corpo negro de suas fontes ionizantes (representativas de temperaturas de estrelas OB, HOLMES, e de núcleos ativos de galáxias). A densidade (n_{den}) foi mantida constante e igual a 10^2 cm^{-3} , assim como $q(\text{H}) = 10^{48.30} \text{ fótons s}^{-1}$ e o raio externo da nebulosa. O valor de $q(\text{H})$ tende a variar com o tipo da estrela, mas foi mantido constante e igual ao valor esperado para uma estrela do tipo O com temperatura específica [7] de 30,231 K. Os valores de temperatura e raio interno variaram como mostrado na Tabela 1. O modelo VII foi removido dos gráficos por possuir uma única zona.

A partir dos parâmetros configurados, o *Cloudy* determina, por exemplo, a *fração de ionização*, as *linhas de emissão* de diferentes elementos químicos, e a *temperatura eletrônica*. Na análise dos modelos resultantes, iremos focar nessas três saídas mencionadas. Mais detalhes sobre os cálculos feitos pelo *Cloudy* podem ser encontrados no manual *Hazy 1* [8].

Tabela 1: Configurações dos modelos feitos.

Nome do modelo	Temperatura	Raio interno
Modelo I	100,000 K	10^{19} cm
Modelo II	100,000 K	10^{16} cm
Modelo III	100,000 K	10^{13} cm
Modelo IV	50,000 K	10^{19} cm
Modelo V	50,000 K	10^{16} cm
Modelo VI	50,000 K	10^{13} cm
Modelo VII	20,000 K	10^{19} cm
Modelo VIII	20,000 K	10^{16} cm
Modelo IX	20,000 K	10^{13} cm

3.1 Temperatura eletrônica

A temperatura eletrônica está ligada à energia cinética dos elétrons livres na nebulosa. O *Cloudy* leva em conta o balanço térmico da nebulosa e calcula a temperatura eletrônica em várias zonas dentro da nebulosa (cada zona representa um ponto nos gráficos das Figuras 1 e 2).

Mesmo para nebulosas ionizadas por uma fonte de mesma temperatura, suas temperaturas eletrônicas podem ser diferentes. Isso fica claro ao compararmos os modelos I e II, cuja única diferença é o menor raio interno da nebulosa no modelo II (o que implica que a nebulosa está mais próxima da fonte ionizante). As temperaturas eletrônicas em I são menores que as em II, girando em torno de 7,500 K e 12,000 K, respectivamente. Isto ocorre pois a temperatura eletrônica

não depende somente da densidade da nebulosa e da temperatura da fonte ionizante, mas também da densidade de fótons que chega na nebulosa (e, portanto, do raio interno). Futuramente, poderemos comparar a temperatura observada no DIG com as temperaturas dos modelos de fotoionização.

3.2 Fração iônica

A fração iônica é a razão de um determinado íon de um elemento químico pela sua abundância em todas as formas (molecular, neutra e ionizada). Ainda na Figura 1, mostramos as diferentes frações iônicas para o elemento oxigênio ao longo da nuvem. Nota-se que, para o modelo I, temos uma nuvem praticamente sem O^{+++} , o que indica que não há muitos fótons ionizantes duros. Esta nebulosa também tem menores temperaturas eletrônicas porque os fótons que arrancam os elétrons do hidrogênio são de menor energia e, portanto, resta menos energia cinética para os elétrons livres no plasma. Em contraste, temos o modelo II e que tem uma ionização mais alta, com a presença de O^{+++} , e maiores temperaturas eletrônicas, ambas consequências da maior taxa de fótons ionizantes mais energéticos atingindo a nebulosa.

3.3 Linhas de emissão

As linhas de emissão podem ser geradas pela liberação de energia em forma de um fóton na recombinação de um elétron com um íon do elemento, ou ainda pela desexcitação radiativa de elétrons entre os diferentes níveis eletrônicos. As razões de linha $[S\ II]\lambda 6716/H\alpha$ e $[N\ II]/H\alpha$, por exemplo, podem auxiliar na identificação do DIG, visto que as linhas produzidas por colisões excitacionais, como $[N\ II]$ e $[S\ II]\lambda 6716$, são mais altas em relação à linha de recombinação $H\alpha$. Portanto, essas razões de linhas são importantes para estudar a influência das HOLMES no DIG, visto que a energia cinética dos elétrons tende a ser mais alta em gases ionizados por este tipo de estrela [3].

O diagrama mostrado na Figura 2 é usado para identificar as diferentes fontes da ionização do gás, separando zonas dominadas por fontes mais duras, como HOLMES ou núcleos ativos, das de formação estelar dominadas fontes menos duras, como estrelas O ou B. A linha cinza é uma linha das linhas desenvolvidas com a proposta para separar formação estelar [9] de outras fontes. Nota-se que os modelos ionizados por fontes mais quentes são os que conseguem

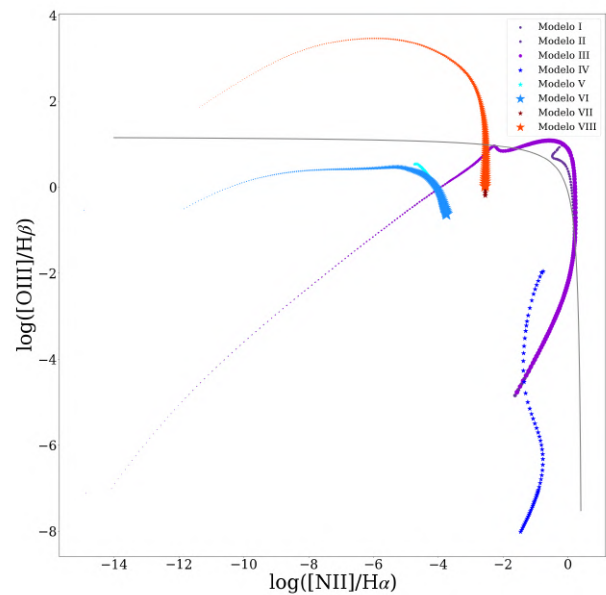


Figura 2: Razões de linhas de emissão $[O\ III]/H\beta$ em função de $[N\ II]/H\alpha$. A linha cinza separa a ionização do gás [9] por antigos modelos de atmosferas de estrelas OB de outras fontes ionizantes. Os símbolos de estrelas representam os modelos com temperaturas de estrelas O e B. Já os tamanhos dos pontos foram organizados de acordo com a localização do ponto no raio nebuloso; pontos menores estão localizadas a distâncias menores da fonte de ionização.

ultrapassar essa linha cinza e atingir maiores valores das razões das linhas $[O\ III]/H\beta$ e $[N\ II]/H\alpha$.

4 Conclusão

O gás difuso ionizado é um gás com baixa densidade, e alta temperatura e ionização. O objetivo final deste trabalho será quantificar a contribuição de estrelas quentes de baixa massa, as HOLMES [4], estrelas que estão localizadas nos discos e halos das galáxias.

Como um passo inicial para o estudo do DIG e dos modelos de fotoionização, construímos nove modelos com o código *Cloudy* [5]. Nesses modelos, verificamos que fontes mais duras produzem nebulosas com maiores razões de linhas de emissão $[O\ III]/H\beta$ em função de $[N\ II]/H\alpha$, e que nebulosas mais distantes da fonte ionizadora têm menores temperaturas eletrônicas. Durante as próximas etapas do projeto, aperfeiçoaremos os modelos para compará-los a dados observacionais de galáxias.

Sobre as autoras

Maria Eduarda Ramos Pedro é estudante de Física Bacharelado na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (mariaramosrpp@gmail.com). É bolsista de iniciação científica na área de Astrofísica, com ênfase no estudo do gás extragaláctico. Também é participante do Mulheres na Ciência, um projeto de divulgação científica.

Natalia Vale Asari é professora no Departamento de Física da UFSC desde 2014 e subcoordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física da UFSC desde 2021. Recebeu o Prêmio Carolina Nemes da Sociedade Brasileira de Física em 2019. Sua pesquisa, em colaboração com colegas na França, México, Polônia e Escócia, é voltada para populações estelares e abundâncias químicas de galáxias.

Referências

- [1] F. Galliano, *A nearby galaxy perspective on interstellar dust properties and their evolution* (2022). [ArXiv:2202.01868](https://arxiv.org/abs/2202.01868).
- [2] L. M. Haffner et al., *The warm ionized medium in spiral galaxies*, [*Reviews of Modern Physics* **81**\(3\), 969 \(2009\)](#). [ArXiv:0901.0941](https://arxiv.org/abs/0901.0941).
- [3] N. Vale Asari e G. Stasińska, *The importance of the diffuse ionized gas for interpreting galaxy spectra*, [*Proceedings of the International Astronomical Union* **15**\(S359\), 371–380 \(2019\)](#).
- [4] N. Flores-Fajardo et al., *Ionization of the diffuse gas in galaxies: hot low-mass evolved stars at work*, [*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **415**\(3\), 2182 \(2011\)](#). [ArXiv:1104.0525](https://arxiv.org/abs/1104.0525).
- [5] G. J. Ferland et al., *The 2017 Release Cloudy*, [*Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* **53**, 385 \(2017\)](#). [ArXiv:1705.10877](https://arxiv.org/abs/1705.10877).
- [6] C. Morisset, *pyCloudy: Tools to manage astronomical Cloudy photoionization code*, [*Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1304.020 \(2013\)](#). [ArXiv:1304.020](https://arxiv.org/abs/1304.020).
- [7] F. Martins, D. Schaerer e D. J. Hillier, *A new calibration of stellar parameters of Galactic O stars*, [*Astronomy & Astrophysics* **436**\(3\), 1049 \(2005\)](#). [ArXiv:astro-ph/0503346](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0503346).
- [8] G. Ferland, *Hazy a Brief Introduction to CLOUDY C17 1. Introduction and commands* 368 (2019).
- [9] L. J. Kewley et al., *Theoretical Modeling of Starburst Galaxies*, [*The Astrophysical Journal* **556**\(1\), 121 \(2001\)](#). [ArXiv:astro-ph/0106324](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0106324).

Universo primitivo com poeira e gás de Chaplygin.

Nathália Mattos Novaes da Rocha¹, Germano Amaral Monerat², Flávio Gimenes Alvarenga³, Sergio Vitorino de Borba Gonçalves³, Gil Oliveira-Neto⁴, Eduardo Vasquez Corrêa Silva² e Cássia Guerra Marques dos Santos Mello²

¹Universidade Estadual de Santa Cruz

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro

³Universidade Federal do Espírito Santo

⁴Universidade Federal de Juiz de Fora

Resumo

Resumo do pôster apresentado na segunda edição do evento As Astrocientistas, realizado entre os dias 7 e 10 de fevereiro 2023.

Abstract

Summary of the poster presented in the second edition of the As Astrocientistas event, held between 7 and 10 February 2023.

Palavras-chave: cosmologia, gás de Chaplygin, universo primordial

Keywords: cosmology, Chaplygin gas, primordial universe

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44992](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5nEspecial.44992)

1 Introdução

Neste trabalho [1], analisamos a dinâmica quântica contida na era de Planck, seu mecanismo de emersão para a fase inflacionária, e sua dinâmica clássica em um modelo isotrópico e homogêneo de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) de um universo fechado ($k=1$), e composto por um fluido perfeito na forma de poeira e gás de Chaplygin. Calculamos, dessa forma, a probabilidade do nosso modelo para o universo tunelar quanticamente e aparecer ao lado direito de uma barreira de potencial como um sistema clássico. Ou seja, investigamos a possibilidade de o Universo surgir classicamente através de um mecanismo de tunelamento quântico, cuja taxa de tunelamento depende da energia média do pacote de ondas (E_m) e dos parâmetros A e B do gás de Chaplygin.

Os pacotes de ondas foram construídos como soluções da equação de Wheeler-DeWitt [2,3], uma equação análoga à equação de Schrödinger independente do tempo, conhecida por ser a equação fundamental da cosmologia quântica, cuja introdução da variável temporal na teoria foi realizada ao aplicar o formalismo de Schutz [4,5].

2 Metodologia

Uma vez que não são conhecidas soluções analíticas para a equação de Wheeler-DeWitt, a resolvemos numericamente com a aplicação do método de diferenças finitas de Crank-Nicolson [6], visto que ele é incondicionalmente estável. Este método permite escrever o operador hamiltoniano na forma de uma matriz tridiagonal ($M \times M$), a partir da qual, obtemos soluções para a equação de Wheeler-DeWitt do nosso modelo na forma de pacote de ondas de norma finita e bem definidos em todo o espaço de solução.

3 Resultados

Para os nossos resultados, verificamos que as taxas de tunelamento evidenciam um aumento à medida que a energia média (E_m) do pacote de ondas aumenta (para parâmetros A e B constantes). Ao fixarmos E_m e B, observamos que as taxas de tunelamento crescem com A, enquanto que para E_m e A fixos, temos que as taxas de tunelamento crescem com B. A taxa de tunelamento varia de forma mais acentuada em relação ao parâmetro A, do que em rela-

ção ao parâmetro B , onde, para energias próximas ao topo da barreira de potencial, as taxas numéricas de tunelamento coincidem com as taxas de tunelamento dadas pela aproximação semiclássica WKB [7].

Ao compararmos nossos resultados com os da referência [8], o qual descreve um modelo similar ao nosso e utiliza o mesmo método, porém considera radiação em vez de poeira, observamos que no caso com fluido de poeira as taxas de tunelamento são muito maiores do que no caso de radiação. Este resultado expõe que modelos com barreiras potenciais mais altas apresentam taxas de tunelamento mais baixas, mesmo com largura muito menor. No caso da poeira, após o processo de tunelamento, o Universo surge classicamente muito maior em tamanho do que no caso da radiação. Com isso, concluímos que o fator de escala x assume valores grandes, e para valores grandes de x o termo do gás de Chaplygin no potencial efetivo se comporta como um termo do tipo constante cosmológica, levando o Universo a uma fase acelerada.

Sobre a autora

Nathália da Rocha é, atualmente, Pós doutoranda em Modelagem Computacional pela Universidade Estadual de Santa Cruz, obteve seu Doutorado em Cosmologia Quântica pela Universidade Federal do Espírito Santo, Mestrado em Astrofísica Extragaláctica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e Bacharelado em Física pelo Departamento de Física Teórica e Experimental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Com experiência nas áreas de Astronomia, Radioastronomia, Astrofísica Extragaláctica, Cosmologia, Cosmologia Quântica, AGNs, Buracos Negros, Quasares, e Astrofísica estelar, sua pesquisa vigente consiste em Modelagem Computacional aplicada à Astrofísica Extragaláctica.

Referências

- [1] N. N. da Rocha et al., *Early universe with dust and Chaplygin gas*, [The European Physical Journal Plus](#) **137**(10), 1103 (2022).
- [2] B. S. DeWitt, *Quantum Theory of Gravity. I. The Canonical Theory*, [Phys. Rev.](#) **160**, 1113 (1967).
- [3] H. G. Schöpf, *Battelle Rencontres - 1967 Lectures in Mathematics and Physics* (Ed. by C. M. DeWitt and J. A. Wheeler). XVII + 557 S. m. Fig. New York/Amsterdam 1968. W. A. Benjamin, Inc., [ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik](#) **50**(12), 782 (1970).
- [4] B. F. Schutz, *Perfect Fluids in General Relativity: Velocity Potentials and a Variational Principle*, [Phys. Rev. D](#) **2**, 2762 (1970).
- [5] B. F. Schutz, *Hamiltonian Theory of a Relativistic Perfect Fluid*, [Phys. Rev. D](#) **4**, 3559 (1971).
- [6] J. Crank e P. Nicolson, *A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type*, [Mathematical proceedings of the Cambridge philosophical society](#) **43**(1), 50 (1947).
- [7] E. Merzbacher, *Quantum mechanics* (John Wiley & Sons, 1998).
- [8] G. A. Monerat et al., *Dynamics of the early universe and the initial conditions for inflation in a model with radiation and a Chaplygin gas*, [Phys. Rev. D](#) **76**, 024017 (2007).