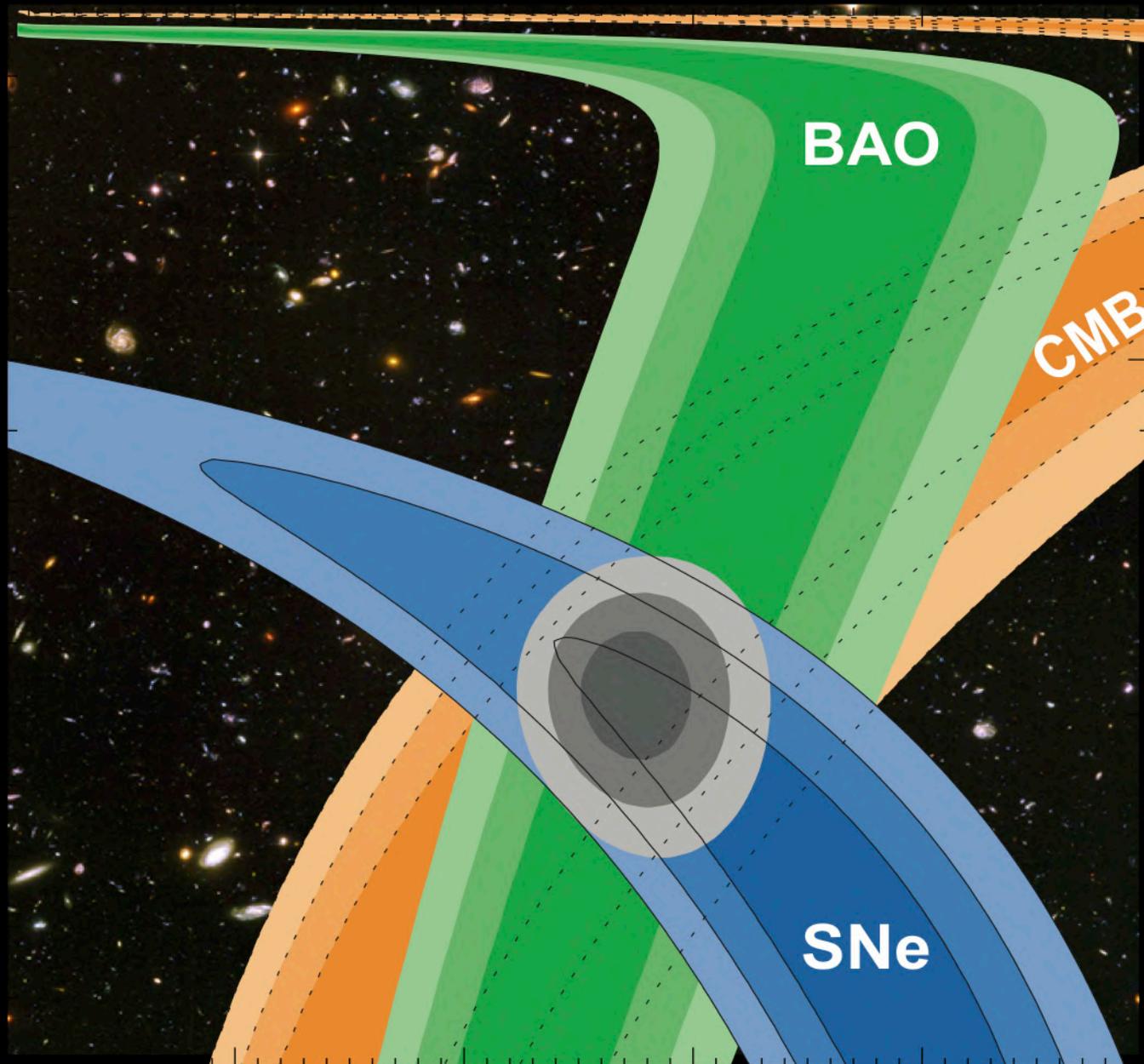


CADERNOS DE ASTRONOMIA

NÚCLEO DE ASTROFÍSICA E COSMOLOGIA DA UFES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ASTROFÍSICA, COSMOLOGIA E GRAVITAÇÃO



UNIVERSO EM EXPANSÃO

CENTENÁRIO DO MODELO
COSMOLÓGICO DE FRIEDMANN



Astrocientistas

Bingo: o cosmos em
ondas de rádio

J-PAS e o mapeamento
do universo

Vida e morte
das galáxias

CADERNOS DE ASTRONOMIA

ISSN 2675-4754

EDITORES RESPONSÁVEIS

Prof. Dr. Alan M. Velasquez Toribio (UFES)
alan.toribio@ufes.br

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 (UFOP)
junior.toniato@ufop.edu.br

CONSELHO CIENTÍFICO

Prof. Dr. Adriano Mesquita Oliveira (UFES)
adriano.ufes@gmail.com

Prof. Dr. Davi Rodrigues (UFES)
davi.rodrigues@cosmo-ufes.org

Prof. Dr. Jose Alexandre Nogueira (UFES)
nogueira@ufes@gmail.com

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

Prof. Dr. Alan M. Velasquez Toribio (UFES)
alan.toribio@ufes.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 (UFOP)
junior.toniato@ufop.edu.br

Prof. Dr. Martín Richarte (UFES)
martin@df.uba.ar

Prof. Dr. Oliver F. Piattella (UFES)
oliver.piattella@cosmo-ufes.org

Prof. Me. Renato Las Casas (UFMG)
renato@fisica.ufmg.br

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

Prof. Dr. Valerio Marra (UFES)
valerio.marra@cosmo-ufes.org

Prof. Dr. William Ricaldi (UFES)
whipolio@gmail.com

Prof. Dr. Winfried Zimdahl
(UFES, Brasil/UD, Alemanha)
winfried.zimdahl@kabelbw.de

RESPONSÁVEL GRÁFICO

Prof. Dr. Martín Richarte (UFES)
martin@df.uba.ar

ENDEREÇO

Núcleo de Astrofísica e Cosmologia,
CCE. Universidade Federal do Espírito
Santo. Av. Fernando Ferrari, 514,
Goiabeiras, Vitória ES- CEP 29075-010
www.periodicos.ufes.br/astronomia

Cosmo-ufes PPGCosmo

SOBRE A REVISTA

Cadernos de Astronomia é uma publicação do Núcleo de Astrofísica e Cosmologia da UFES, Cosmo-ufes, e do Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação, PPGCosmo, que visa veicular textos científicos, de ensino, de divulgação científica e resenhas sobre assuntos de relevância e atualidade, focados em Astronomia, Astrofísica, Cosmologia e áreas correlatas. Os artigos publicados nos Cadernos de Astronomia são destinados a um amplo público, e podem ser submetidos a revista não apenas por profissionais trabalhando na área de ensino e/ou pesquisa mas também por qualquer interessado nos assuntos listados anteriormente.

SUBMISSÕES

A revista Cadernos de Astronomia aceita, para publicação, artigos e resenhas inéditos versando sobre temas de divulgação científica, história da ciência, ensino e pesquisa nas áreas de astronomia, cosmologia e disciplinas afins. Os autores que desejarem publicar textos originais nesta revista deverão submetê-los exclusivamente usando a seção submissões no portal da revista, com especial atenção às Normas de Formatação.

NÚCLEO COSMO-UFES

O Núcleo de Astrofísica e Cosmologia da UFES, Núcleo Cosmo-ufes, foi criado em 2017, reunindo pesquisadores, pós doutorandos e estudantes atuando nas áreas de Astrofísica, Cosmologia e Gravitação. O Núcleo Cosmo-ufes desenvolve atividades de pesquisa científica, ensino e extensão, sendo responsável pela organização de diversas conferências de abrangência estadual, nacional e internacional. Ele possui também cooperações com outras instituições acadêmicas e científicas do Brasil e do Exterior.

As atividades do Núcleo Cosmo-ufes estão descritas na página: www.cosmo-ufes.org.

PPGCOSMO

O Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação - PPGCosmo envolve pesquisadores de instituições do Brasil e exterior, formando doutores em um ambiente de pesquisa internacional. O PPGCOSMO atua também em projetos de incentivo a práticas científicas em escolas de ensino básico e atividades de divulgação científica.

Maiores informações:

ppgcosmo.cosmo-ufes.org e www.cosmologia.ufes.br

Capa Imagem 1: Hubble Ultra Deep Field-ESA-Hubble.

Capa Imagem 2: The Hubble Space Telescope Cluster Supernova Survey. Suzuki, et al., ApJ 746, 85 (2012).

Contra-capac Imagem 3: NASA-ESA-Hubble Space Telescope, Illingworth, Magee, Whitaker, Bouwens e Oesch. Hubble Legacy Field Team.

Carta ao Leitor

O universo se expande. Este é o um dos pilares do modelo cosmológico padrão, o modelo Λ CDM, que contém a matéria ordinária além de duas componentes exóticas, ainda não detectadas diretamente, a matéria e a energia escuras. O modelo cosmológico padrão é o que melhor descreve os dados observacionais atualmente disponíveis. A possibilidade que o universo esteja em expansão, conceito essencial desse modelo, foi pela primeira vez evocada em um artigo publicado há precisamente 100 anos atrás pelo matemático russo Alexander Friedmann. Até a publicação do artigo de Friedmann, na revista alemã *Zeitschrift für Physik*, a partir de uma tradução do manuscrito em russo realizada pelo físico austríaco Paul Ehrenfest, acreditava-se que o universo era finito e estático. A cosmologia, enquanto disciplina científica, encontrava-se então em seus primórdios, com muito poucos dados observacionais disponíveis e com inevitáveis dificuldades conceituais e matemáticas para se criar um modelo que o descrevesse. Friedmann foi o primeiro a extrair, a partir da recém criada teoria da relatividade geral, um modelo onde o universo era ao mesmo tempo simples, por ser globalmente homogêneo e isótropo, e dinâmico. Cem anos depois, o modelo cosmológico padrão, submetido agora ao escrutínio de um número crescente de dados observacionais, cada vez mais precisos, faz uso de forma fundamental destes dois princípios utilizados por Friedmann na descrição do universo em grandes escalas: a simplicidade matemática e o seu caráter dinâmico, este representado pela expansão cósmica.

A Seção Temática da presente edição dos Cadernos de Astronomia gravita em torno da celebração do centenário da publicação do artigo de Alexander Friedmann, tanto pela sua importância para a física e astronomia quanto para a própria visão que temos hoje do cosmo. O artigo de Friedmann estabeleceu um paradigma científico que parece cada vez mais sólido, tanto do ponto de vista teórico quanto observacional. A vida e obra de Friedmann, este matemático russo morto de tifo, prematuramente, na idade de 37 anos, é abordada em artigos assinados por Vladimir Mostepanenko, Ioav Waga e Antônio Videira & Cássio Vieira. Um aspecto surpreendente da expansão cósmica é revelado no artigo de Ribamar Reis e Beatriz Siffert: o universo não só se expande, mas o faz de forma acelerada.

O Brasil é protagonista em projetos observacionais em astrofísica e cosmologia. Isto não é estritamente uma novidade, mas é amplamente desconhecido do grande público e, pode-se dizer, até mesmo de boa parte do meio acadêmico. No entanto, o envolvimento e o protagonismo do Brasil em projetos observacionais não só existe como é crescente. Exemplos disto são os projetos BINGO, mapeando o universo em ondas de rádio, e o projeto J-PAS, que utiliza no mapeamento do universo uma revolucionária técnica fotométrica. Complementando a Seção Temática, estes dois projetos são descritos em textos de Carlos Alexandre Wuensche e Cássio Pigozzo. É importante que o público brasileiro se torne consciente dos esforços feitos no Brasil para inserir o país de forma mais profunda na vanguarda científica, no caso, nos campos da astrofísica e cosmologia. E, também, que os jovens estudantes e pesquisadores se deem conta

das oportunidades que existem no campo experimental e o observacional dentro das nossas fronteiras, e se corrija o erro de pensar que ciência desse porte se faz apenas nos países do hemisfério norte.

Ainda nesta edição, a Seção Textos Clássicos traz o artigo seminal de Friedmann em língua portuguesa, uma tradução inédita realizada por Winfried Zimdahl e Hermano Velten. Vladimir Lukash apresenta ao final uma expressiva reflexão sobre Friedmann e sua emblemática contribuição para a ciência. Estes textos, em conjunto com a Seção Temática, representam uma homenagem a uma das mais extraordinárias revoluções científicas dos últimos 100 anos: o universo não é estático, ele é dinâmico e se expande, em acordo com uma das possibilidades exploradas por Friedmann.

A Seção Divulgação Científica, Ciência & Sociedade apresenta artigos que abordam a vida e morte das galáxias, a construção do modelo atômico de Bohr e o importante e atual problema da desigualdade de gênero observada também na física e astronomia. Tópicos relativos ao problema do ensino e difusão da astronomia são também discutidos nesta edição. Por fim, esta edição traz também um resumo da IV Mostra de Astronomia do ES, realizada em 2021, apesar de todos problemas causados pela pandemia do Covid-19, e um texto fruto de um dos trabalhos premiados na mostra.

Os Editores

Sumário

Seção Temática – Universo em Expansão: Centenário do Modelo Cosmológico de Friedmann

Apresentação

Os Editores 5

Friedmann e a descoberta da expansão do universo

Ioav Waga 6

Notas para uma história da cosmologia entre as décadas de 1910 e 1930

Antonio Augusto Passos Videira e Cássio Leite Vieira 10

Alexander Friedmann e o universo em expansão

Vladimir Mostepanenko 17

Supernovas do tipo Ia e a expansão do Universo

Ribamar R. R. Reis e Beatriz B. Siffert 21

J-PAS: o consórcio astronômico hispano-brasileiro

Cassio Pigozzo 33

A cosmologia de 21 cm e o radiotelescópio BINGO

Carlos Alexandre Wuensche 43

Divulgação Científica, Ciência & Sociedade

Como astrônomos estudam o mistério da morte das galáxias

Thiago Signorini Gonçalves 58

O modelo atômico de Bohr e o início da mecânica quântica

Alan M. Velasquez-Toribio 65

As Astrocientistas e o paradoxo da desigualdade de gênero na física

Carla R. Almeida, Paola C. M. Delgado e Tays Miranda 84

Artigos

On the mode structure of imperfect fluids

Winfried Zimdahl 101

Ensino

Uma proposta de introdução à astrofotografia

Leopoldo Gorges Neto et al. 109

Uma proposta de atividade didática sobre a medição do raio da Terra baseada no método empregado por Eratóstenes

Thiago Costa Caetano e Camila Cardoso Moreira 121

Ensinar e aprender ciência: projetos interdisciplinares

Lucas Antonio Xavier et al. 134

MAES 2021 - Trabalhos Premiados

IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo

Comitê Organizador da MAES 2021 141

Plutão e as descobertas da sonda New Horizons

Ágata Mayra de Souza Batista et al. 145

Textos Clássicos

O universo dinâmico de Friedmann

Hermano Velten e Winfried Zimdahl 151

Notas

A vida é um milagre em ação

Vladimir N. Lukash 159

O artigo de Alexander Friedmann e o universo em expansão

O artigo do matemático russo Alexander Friedmann, publicado em 1922 na revista alemã *Zeitschrift für Physik*, representou uma profunda mudança na nossa visão do cosmo. Pela primeira vez na história da ciência, o universo passa a ser visto como um sistema dinâmico: ele pode expandir ou contrair, mas não seria estático. Isto se contrapunha à concepção vigente até então em que prevaleciam os modelos cosmológicos estáticos. As observações de galáxias longínquas, realizadas pouco depois, indicaram um universo em expansão, uma das possibilidades evocadas por Friedmann. É difícil avaliar de forma completa a importância desta então inédita visão do cosmo. O conceito de expansão do universo tornou-se elemento essencial do atual modelo cosmológico padrão, e permeia todas as atividades científicas em astrofísica e cosmologia, tanto teóricas como observacionais. Não menos importante, a ideia que o universo se expande constitui uma nova forma do homem se ver no cosmo, e as implicações deste fato são não negligenciáveis.

Os textos que seguem discutem quem foi Friedmann, qual foi trajetória pessoal e científica, e as diversas implicações do novo paradigma que ele propiciou. Friedmann foi um brilhante matemático, morto prematuramente de tifo, na idade de 37 anos, cinco anos após ter publicado seu artigo seminal sobre os aspectos dinâmicos do universo como um todo. As condecorações que recebeu pela sua participação, como aviador, na Primeira Guerra Mundial, revelam aspectos importantes de sua personalidade. Viveu em um momento conturbado da história do seu país, que resultou na Revolução de 1917, que marcou o fim do regime czarista e o início a era soviética, após uma sangrenta guerra civil. Isto não impediu que ele desse uma das contribuições fundamentais para a ciência moderna através da proposta que o universo é dinâmico e se expande.

A proposta de um universo em expansão não teve, frequentemente, um acolhimento favorável. Albert Einstein foi o parecerista do artigo de Friedmann e se opôs à sua publicação argumentando erros de cálculos. Na verdade, Einstein é que se enganou nos cálculos como Friedmann mostraria explicitamente. Havia também uma resistência a ver o universo como um sistema dinâmico, algo inédito praticamente em toda a história da ciência. Hoje, não há praticamente dúvida que o universo se expande. Aliás, não só se expande como o faz de forma acelerada. Isto cria espaço para possíveis novos paradigmas científicos.

Os textos anexos retratam vários aspectos deste fascinante episódio da ciência. Entre estes textos está a primeira tradução do artigo de Friedmann de 1922 para o português.

O centenário do artigo de Friedmann merece ser comemorado e gerar novas reflexões sobre nossa descrição e visão do cosmo.

Os editores

Friedmann e a descoberta da expansão do universo

Ioav Waga

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

O objetivo deste artigo é descrever, de forma sucinta, o início da cosmologia moderna bem como destacar a contribuição fundamental de Friedmann no seu desenvolvimento.

Abstract

The purpose of this article is to briefly describe the beginnings of modern cosmology as well as highlight Friedmann's fundamental contribution to its development.

Palavras-chave: cosmologia, expansão do universo, Friedmann

Keywords: cosmology, expanding universe, Friedmann

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37332](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37332)

1 Introdução

*“ I shall speak of the theoretical work of Einstein of Germany, de Sitter of Holland, Lemaître of Belgium. For observational data I turn to the Americans Slipher, Hubble, Humason, recalling however that the vitally important datum of distance is found by a method which we owe to Hertzprung of Denmark. ... My subject disperses the galaxies, but it unites the earth. May no ‘cosmical repulsion’ intervene to sunder us ”.*¹

Arthur Eddington na abertura da palestra pública proferida no encontro da “União Astronômica Internacional”, realizada em setembro de 1932, em Cambridge (Massachusetts).

Uma das grandes questões da astronomia no início do século XX era saber a natureza das nebulosas espirais. Alguns astrônomos argumentavam serem elas um sistema de estrelas que nos cercavam enquanto outros defendiam a tese de que as nebulosas espirais eram sistemas semelhantes

à nossa própria galáxia e situadas bem mais distantes que as estrelas usuais. A existência de nebulosas já era conhecida há centenas de anos.

Em abril de 1920 ocorreu um debate entre dois grandes astrônomos da época, Herbert Curtis e Harlow Shapley, que entrou para a história da cosmologia. Uma das questões do debate era a natureza das nebulosas espirais. Curtis dizia: “A evidência hoje aponta fortemente para a conclusão de que as espirais são galáxias individuais ou universos ilhas, comparáveis em dimensão e número de componentes individuais à nossa própria galáxia.” Enquanto que Shapley defendia um outro ponto de vista: “Me parece que a evidência é oposta a que as espirais sejam galáxias de estrelas comparáveis à nossa própria galáxia. Até o presente não há razão para modificarmos a hipótese tentativa de que as espirais são simplesmente objetos nebulosos.” A disputa não foi resolvida então. O que faltava? Dados precisos sobre a nossa distância até as nebulosas.²

Em 1923, o astrônomo americano Edwin P. Hubble inicia no Observatório de Monte Wilson (EUA) uma série de observações de Andrômeda, a mais famosa das nebulosas espirais. No início de outubro ele observa em Andrômeda duas novas e uma estrela variável do tipo cefeida. Cefeidas são estrelas instáveis, com aproximadamente dez vezes a massa do Sol e cujo brilho, devido a

¹“Falarei do trabalho teórico de Einstein da Alemanha, de Sitter da Holanda, Lemaître da Bélgica. Para os dados observacionais, recorro aos americanos Slipher, Hubble, Humason, lembrando, porém, que o dado vitalmente importante da distância é encontrado por um método que devemos a Hertzprung da Dinamarca. ... Meu assunto dispersa as galáxias, mas une a terra. Que nenhuma ‘repulsão cósmica’ intervenha para nos separar.”

²Para uma descrição detalhada do debate entre Shapley e Curtis, ver Ref. [1].

variação de sua opacidade, oscila periodicamente. Existe uma correlação entre a luminosidade absoluta (energia por unidade de tempo emitida pela fonte) média dessas estrelas e o período entre dois máximos. Assim, estimando a luminosidade absoluta e medindo a luminosidade aparente (energia por unidade de tempo, por unidade de área recebida pelo detector) Hubble pode determinar a nossa distância à Andrômeda e concluir que essa nebulosa é uma galáxia espiral semelhante a nossa Via Láctea e que, sabemos hoje, encontra-se a uma distância aproximada de 2,9 milhões de anos luz.

Em 1901, Vesto M. Slipher, um jovem astrônomo, então com 25 anos, foi contratado para trabalhar no Observatório Lowell (Arizona, EUA). Em 1912, ele percebeu que as linhas espectrais de Andrômeda estavam no lugar errado, elas estavam deslocadas para o azul, isto é para a região do espectro de menores comprimentos de onda. Medindo o deslocamento espectral ele conseguiu determinar a velocidade de Andrômeda em relação à Terra. Isso foi possível devido ao fenômeno denominado efeito Doppler, nome dado em homenagem à Christian Doppler, cientista austríaco que em 1842 o descobriu. No caso de uma onda que propaga-se em um meio material (uma onda sonora por exemplo), esse efeito manifesta-se em uma mudança na frequência observada sempre que o detector ou a fonte movem-se em relação ao meio. Observamos que o som vindo da sirene de uma ambulância torna-se mais agudo, maior frequência, quando esta aproxima-se de nós e mais grave quando ela se afasta. O efeito ocorre não apenas com ondas sonoras mas com ondas eletromagnéticas, como a luz vinda de uma galáxia, também. A distância entre duas cristas de uma onda (comprimento de onda) medida por um observador, é menor (deslocamento para o azul, som agudo) quando a fonte emissora aproxima-se do observador do que quando a fonte está parada. Quando a fonte se afasta do observador o comprimento de onda medido por ele é maior (deslocamento para o vermelho, som grave) Para a radiação eletromagnética temos:

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}} = \frac{v}{c}$$

onde c é a velocidade da luz, $\lambda_{\text{observado}}$ é o comprimento de onda observado, λ_{emitido} é o comprimento de onda no referencial da fonte, v é a velocidade da fonte em relação ao observador, e z

é o chamado desvio para o vermelho. Velocidades positivas indicam afastamento da fonte em relação ao observador e correspondem a z positivo.

A velocidade de Andrômeda estimada por Slipher foi da ordem de -300 km/s. Em 1915 ele já tinha 40 medidas de espectro de nebulosas com 15 velocidades radiais estimadas, número que sobe para 25 em 1917. Contrariamente ao observado para Andrômeda, a grande maioria apresentava velocidades positivas. Por exemplo, das 41 nebulosas com redshift ³ medido em 1923, apenas 5 (incluindo Andrômeda) aproximavam-se da Terra. A velocidade das nebulosas era considerada muito alta, em média mais de 20 vezes as velocidades típicas encontradas para estrelas.

A cosmologia moderna iniciou-se com Einstein, em 1917, pouco tempo após ele haver publicado seu trabalho sobre a teoria do campo gravitacional, a relatividade geral. O primeiro modelo cosmológico relativista proposto por ele, além de espacialmente homogêneo, isotrópico e finito (com curvatura espacial constante e positiva), possui a propriedade de ser estático. Acreditava-se naquela época ser esta uma característica do universo. Sendo a gravitação atrativa, para obter um universo estático Einstein modificou as suas equações originais do campo gravitacional introduzindo um termo repulsivo, a chamada constante cosmológica (Λ). Einstein acreditava que seu modelo possuía as seguintes virtudes: 1) podia relacionar a massa do universo com a constante cosmológica, o que estava em acordo com o princípio de Mach; 2) mostrou ser possível construir um modelo cosmológico consistente com a relatividade geral; 3) acreditava ser este o único modelo com essas características.

Nesse mesmo ano, o astrônomo holandês Willem de Sitter publicou trabalhos nos quais obteve uma nova solução da relatividade geral, com constante cosmológica, estática, porém sem matéria. De Sitter mostrou que em seu universo a velocidade de afastamento de objetos (partículas teste) aleatoriamente espalhados aumentaria com a distância. Esta propriedade, que passou a ser conhecida como “efeito de Sitter”, podia explicar o desvio no espectro de nebulosas espirais observado pelo astrônomo americano Vesto M. Slipher alguns anos antes. Einstein não apreciava muito a solução de de Sitter, entre outras razões, por ela apresentar um horizonte de evento, isto é, uma

³Desvio para o vermelho em inglês.

distância além da qual raios luminosos não poderiam chegar ao observador. O fato de o universo de de Sitter ser desprovido de matéria foi visto também por Einstein como uma característica indesejável desse modelo. Contudo, isso não impediu que ele fosse investigado, à época, como uma possível descrição do universo real. Como a densidade do universo é baixa, a solução de de Sitter era considerada como uma aproximação de densidade zero.

Essa era a situação em 1917, quando a recém criada teoria da relatividade geral ainda não era muito aceita. A relatividade geral ganhou notoriedade internacional somente após os resultados de medidas do desvio da luz, observadas durante o eclipse solar de 1919 pelas expedições britânicas à ilha de Príncipe (Guiné) e Sobral (Brasil). Como vimos, nessa época a existência de galáxias ainda não era conhecida. Estas só foram descobertas com Hubble, um pouco mais tarde, em 1923. Sabia-se que a velocidade típica de estrelas é baixa e este fato sustentava a idéia de um universo estático. É interessante salientar que, não apenas Einstein, como também de Sitter não acreditavam então em um universo em expansão.

A possibilidade teórica de um universo em expansão só surgiu em 1922 com Friedmann. Filho de artistas (o pai era bailarino e a mãe professora de piano), Alexander Alexandrovich Friedmann, nasceu em 16 de junho de 1888 na cidade de São Petersburgo e desde cedo mostrou um grande talento para a matemática. Em 1906, ele ingressou na Universidade de São Petersburgo para estudar matemática pura e aplicada. Nesse mesmo ano publicou seu primeiro trabalho científico com Jacob Tamarkin, conhecido matemático russo-americano, seu amigo e colaborador. Após formar-se, iniciou uma pós-graduação em meteorologia em Leipzig (Alemanha). Durante a Primeira Guerra Mundial serviu na Força Aérea e esteve envolvido em missões na frente austríaca. Após a guerra foi transferido para a Estação Aeronáutica Central de Kiev e um ano depois conseguiu uma posição na Universidade de Perm. Nessa época a Rússia estava mergulhada em uma guerra civil. Em 1920, quando a revolução russa ainda não havia terminado, ele retornou à São Petersburgo para trabalhar em hidrodinâmica no Observatório Geofísico de Main. Foi nesse período que surgiu o seu interesse pela relatividade geral (que devido à guerra e à revolução era pouco

conhecida na Rússia). Possivelmente a confirmação do valor previsto pela relatividade geral para o desvio da luz provocado pelo campo gravitacional do Sol, obtida após o eclipse de 1919, estimulou esse interesse. Em 1925, Friedman já era considerado um dos principais físicos teóricos de Leningrado (como era então chamada a cidade de São Petersburgo). Nesse mesmo ano, realizou um vôo de balão para estudar a alta atmosfera que atingiu 7400 m, recorde soviético da época. Pouco tempo depois contraiu tifo e faleceu, precocemente, aos 37 anos.

Apesar de haver publicado seu hoje famoso artigo de 1922 na prestigiosa revista *Zeitschrift für Physik*, o trabalho de Friedmann não recebeu a devida atenção. Nesse artigo em que considerou espaços com curvatura constante e positiva, Friedmann obteve pela primeira vez soluções expansionistas (com e sem constante cosmológica) das equações de Einstein. É curioso que Eddington, em suas palavras reproduzidas no início deste texto, não tenha se referido a ele. É difícil entender essa omissão. Alguns autores atribuem o pouco interesse despertado, à época, ao trabalho de Friedmann à abordagem eminentemente matemática por ele empregada nesse artigo e no seguinte, publicado em 1924 na mesma revista, onde ele analisa as soluções com curvatura espacial constante e negativa. De fato, nesses trabalhos ele extraiu poucas consequências físicas de suas soluções. Por exemplo, em nenhum momento ele fez referência à questão do desvio para o vermelho, que é uma propriedade fundamental desses modelos. Friedmann, ao que parece, estava mais interessado em obter soluções expansionistas que generalizassem as soluções de Einstein e de de Sitter. Não devemos, contudo, deixar de enfatizar a enorme e fundamental contribuição dada por ele à cosmologia. Einstein após 1930, quando finalmente aceitou a idéia de que o Universo está em expansão, sempre citou os trabalhos de 1922 e 1924 de Friedmann.

Sem dúvida Friedmann foi um pioneiro, sendo um dos pais da cosmologia moderna. Ele foi um cientista que sugeriu novos caminhos e idéias, alargando de forma fundamental nossa visão sobre o Universo. Em seu trabalho de 1922, foi quem pela primeira vez considerou a possibilidade de um universo em expansão. Foi ele também quem pela primeira vez, em seu trabalho de 1924, considerou a possibilidade de um universo

com um volume infinito. É interessante que a possibilidade de um universo em expansão tenha sido questionada por Einstein. Einstein rejeitava a idéia de um universo em expansão e chegou a publicar uma nota, em 1922, onde afirma que o trabalho de Friedmann estava matematicamente incorreto. Contudo, um ano depois admitiu seu erro e reconheceu a existência de soluções variáveis no tempo, como sugerido no trabalho de Friedmann, sem contudo reconhecer, então, sua relevância.

O universo descrito pelo modelo de Friedmann, além de expansionista, é espacialmente homogêneo, isotrópico em relação a qualquer ponto e, em alguns casos, possui uma origem no passado em que a densidade da matéria diverge. Esse modelo tornou-se a base do modelo padrão da cosmologia. Friedmann contraiu tifo em agosto de 1925 e faleceu um mês depois em 16 de setembro de 1925 aos 37 anos. É lamentável que a morte prematura de Friedmann nos tenha privado de novas e importantes contribuições que ele provavelmente faria ao desenvolvimento da cosmologia.

Finalizamos este texto reproduzindo as palavras de Ekaterina Petrovna Dorofeyeva, primeira esposa de Friedmann, que assim o descreveu em suas memórias: “Sempre pronto a aprender com todos que sabiam mais do que ele, percebeu que em seu trabalho estava abrindo novos caminhos, difíceis e inexplorados por qualquer um”. Ele gostava de citar as seguintes palavras de Dante: “L’acqua ch’io prendo giammai non si corse” (As águas em que estou entrando ninguém jamais cruzou).

Sobre o autor

Ioav Waga (ioav@if.ufrj.br) possui Graduação em Física pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1975), Mestrado em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (1983) e Doutorado em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1988). É professor titular, colaborador e aposentado da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência na área de física, com ênfase em cosmologia, gravitação e fi-

sica das partículas elementares e campos. Em sua linha de pesquisa atual busca entender a natureza da matéria e da energia escura.

Referências

- [1] V. F. P. de Andrade e O. F. Júnior, *Via láctea: ilha isolada? A Via Láctea e as nebulosas espirais numa reportagem da Popular Science, 1922*, *Cadernos de Astronomia* **2**(1), 79 (2021).
- [2] I. Waga, *A expansão do universo*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**(2), 163 (2000).
- [3] I. Waga, *Cem anos de descobertas em cosmologia e novos desafios para o século XXI*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**(1), 157 (2005).
- [4] A. Belenkiy, *Alexander Friedmann and the origins of modern cosmology*, *Physics Today* **65**(10), 38 (2012).
- [5] A. A. Friedmann, *Papers On Curved Spaces and Cosmology* (Minkowski Institute Press, Montreal, 2014).
- [6] H. Kragh e R. W. Smith, *Who discovered the expanding universe?*, *History of Science* **41**(2), 141 (2003).
- [7] J. J. O’Connor e E. F. Robertson, *Aleksandr Aleksandrovich Friedmann*, MT MacTutor (1997). Disponível em <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Friedmann/>, acesso em jan. de 2022.
- [8] E. A. Tropp, V. Ya. Frenkel e A. D. Chernin, *Alexander A. Friedmann: The Man Who Made The Universe Expand* (Cambridge University Press, Nova York, 1993).
- [9] H. Nussbaumer e L. Bieri, *Discovering the Expanding Universe* (Cambridge University Press, Nova York, 2009).

Notas para uma história da cosmologia entre as décadas de 1910 e 1930

Antonio Augusto Passos Videira¹ e Cássio Leite Vieira²

¹Universidade do Estado do Rio de Janeiro e Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

²Jornalista e Doutor em História da Ciência pela UFRJ

Resumo

Uma das grandes conquistas intelectuais ao longo do século passado foi a incorporação da cosmologia – até então área de estudo marginalizada por suas vinculações com a metafísica e a teologia – ao conjunto das ciências naturais – em particular, à física e à astronomia. Neste artigo, apresentamos, em termos gerais e com linguagem apropriada ao grande público, uma das primeiras conquistas marcantes da cosmologia: a ideia de que o Universo está em expansão, a qual foi rejeitada inicialmente por aquele que é visto como criador da versão moderna desse campo, Albert Einstein. Apesar de parte da comunidade de cosmólogos à época ter visto com desconfiança ou mesmo rejeitado a visão de um universo em expansão, essa ideia foi confirmada observacionalmente pela astronomia ainda na década de 1920.

Abstract

One of the greatest intellectual achievements throughout the last century was the incorporation of Cosmology – by that time, a marginalized area due to its relation to metaphysics and theology – to the set of natural sciences – in particular, physics and astronomy. In this article, we present, in general terms and in a lay-person language, one of the first great achievements of cosmology: the idea that the universe is expanding, which was initially rejected by the one who is seen as the creator of that field, Albert Einstein. Although part of the community of cosmologists during those times usually distrusted or even rejected the view of an expanding universe, this idea was confirmed on an observational basis by Astronomy during the decade of the 20s.

Palavras-chave: história da ciência, universo em expansão, modelos cosmológicos, astrofísica, astronomia.

Keywords: history of science, expansion of the universe, cosmological models, astrophysics, astronomy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.36680](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.36680)

A década de 1920 é marcada por dois aspectos importantes para a história da cosmologia. O primeiro deles, fortemente ligado à comunidade de astrônomos e a seus resultados observacionais, permitiu que, pouco a pouco, fosse sendo construída a noção de que o universo era bem mais do que a Via Láctea. E que ele está em expansão, uma das maiores descobertas científicas da humanidade.

A segunda dessas correntes tem a ver com o envolvimento de teóricos – grande parte, matemáticos – com a relatividade geral. Desse interesse surgiram vários modelos, muitos deles sem que os autores tivessem a menor preocupação com uma base física, real, para os cenários que brotavam da resolução daquele conjunto de 10 equações da relatividade geral. Era um tipo de teoria pela teoria, na busca de soluções que, uma vez

obtidas, nem sempre eram confrontadas com a realidade, para ver se eram plausíveis. Portanto, muitos desses modelos foram considerados apenas abstrações matemáticas interessantes – ou esteticamente horrorosas, para alguns.

Talvez, o interesse de físicos teóricos e matemáticos tenha a ver com o grau de complexidade da teoria da relatividade para astrônomos e físicos em geral. Mas foram astrônomos, como o holandês Willem de Sitter (1872-1934) e o britânico Arthur S. Eddington (1882-1944), que adaptaram a relatividade geral para a astronomia. Este último foi responsável por um relatório de 1918 considerado muito completo, assim como por um tipo de revisão (1923) que Einstein classificou como uma “excelente apresentação” da teoria.

A partir da segunda metade da década de 1910, aos poucos, os dados observacionais astronômicos

permitiram localizar a posição do Sol em relação à nossa galáxia. De um posicionamento que se acreditava central, nossa estrela foi deslocada para longe desse ponto.

E, concomitantemente, começaram a ser estabelecidos objetos cósmicos cuja luminosidade poderia servir com um tipo de “régua” para medir distâncias com precisão – operação que sempre se mostrou muito difícil para os astrônomos. Uma dessas estruturas eram as chamadas estrelas ceifeiras, objetos de grande massa cuja luminosidade varia em períodos de tempo bem definidos. Nessa busca por uma “vela-padrão” – que progrediu bastante na década de 1910 –, vale destacar o trabalho da astrônoma norte-americana Henrietta Leavitt (1868-1921).

Os avanços do início século passado – incluindo o próprio tamanho da Via Láctea – impulsionaram o desenvolvimento da astronomia e, consequentemente, da cosmologia. A análise da luz emitida por nebulosas indicava que elas deveriam estar em movimento em relação ao sistema solar (ou Terra). E isso semeou a desconfiança de que não poderiam ser parte da Via Láctea. Com isso, voltou de forma intensa o debate sobre se nossa galáxia seria muito maior do que se acreditava ou se era apenas parte de um universo formado por “ilhas” semelhantes.

Os principais protagonistas nesse debate foram os astrônomos norte-americanos Halow Shapley (1885-1972) e Herber Curtis (1872-1942). Vale lembrar que, na década de 1920, os principais telescópios ópticos estavam instalados em território norte-americano, fazendo com que os astrônomos desse país fossem os mais capacitados para observar o céu.

Os resultados experimentais da década seguinte mostraram, por exemplo, que a então chamada Nebulosa de Andrômeda estaria a mais de 1,5 milhão de anos-luz da Terra – um ano-luz equivale a cerca de 9,5 trilhões de km. Anteriormente, a distância até Andrômeda – que, hoje, sabemos ser outra galáxia – era estimada em aproximadamente 900 mil anos-luz.

Esses dados fizeram com que grande parte da comunidade de astrônomos passasse a tender à hipótese dos universos-ilha, ou seja, a Via Láctea era apenas mais um “universo” dentro de algo muito maior. E as nebulosas espirais reforçavam essa tendência. Essa corrente estava fortemente baseada nas observações astronômicas, e a física

tinha pouco contribuído para isso.

Quase concomitantemente com o artigo de Einstein de 1917 – no qual se encontram as bases da cosmologia moderna –, de Sitter publicou seu modelo cósmico com base na relatividade geral, ou seja, achou outras soluções para o conjunto de 10 equações da relatividade. E, de certa forma, esses resultados surpreenderam Einstein, pelo fato de o cenário apresentado não parecer ter muitos vínculos com a realidade – pelo menos, com aquela em que Einstein acreditava à época.

Willem de Sitter apresentou três modelos (ou soluções das equações). Um deles chamou mais a atenção, por descrever um universo sem matéria, mas com constante cosmológica diferente de zero. Traduzindo: um universo exótico, vazio, em que o espaço-tempo se expandia. Além da expansão, outro dissabor para Einstein: o princípio de Mach parecia não valer no universo de seu colega astrofísico. Em termos simples, esse princípio (ou conjectura) alega que as leis da física são determinadas pela estrutura do universo em larga escala.

Para historiadores da área, como o dinamarquês Helge Kragh, a cosmologia do século passado orbitou em torno de um só tema: entender os universos de Einstein e de Sitter, bem como as posteriores variações desses modelos.

Certa vez, perguntado se o espaço-tempo do universo de de Sitter não contrariaria a teoria da relatividade restrita – pelo fato de o espaço-tempo, com a expansão acelerada, ter que necessariamente ultrapassar a velocidade da luz –, Einstein simplesmente respondeu que o espaço-tempo “não é uma coisa”, isto é, o limite da velocidade da luz só vale para corpos com massa.

Parece uma resposta simples, mas, do ponto de vista filosófico, a discussão sobre a materialidade (ou não) do espaço-tempo arrastou-se pelo século e até hoje é motivo de dúvida e discussão entre astrofísicos e filósofos. Einstein reafirmou várias vezes, ao longo da vida, sua crença na imaterialidade do espaço-tempo.¹

Os modelos de de Sitter se juntariam àqueles que brotariam da relatividade geral com base meramente na solução matemática das equações, sem muita preocupação com o contato com a astronomia observacional. E isso, de certa forma,

¹Esse é um tema que ainda provoca discussões que alcançam o domínio da filosofia da ciência. Um filósofo atual que se interessa muito por essa questão é o australiano John D. Norton, professor na Universidade de Pittsburgh (EUA).

reforçava a resistência da comunidade astronômica em relação à cosmologia.

Nessa linha, vale destacar os resultados obtidos, no início da década de 1920, por Alexander Friedmann (1888-1925). Neles, esse matemático e meteorologista russo detalhava, com base em uma métrica desenvolvida por ele, modelos de universos que se expandiam ou se contraíam. A diferença essencial com o modelo de de Sitter era a ausência da constante cosmológica. Para muitos, essa dinâmica do universo (contração ou expansão) não seria nem mesmo passível de observação – mas, em breve, a história mostraria que essa era uma conclusão precipitada.

Einstein atacou vigorosamente esses modelos, com argumentos equivocados. Os resultados de Friedmann – surgidos em um período em que o universo era praticamente limitado à Via Láctea e estático – foram publicados em uma revista soviética (portanto, em russo) e não chamariam a atenção da comunidade científica prontamente. Não tiveram à época grande repercussão, para além das críticas de Einstein.

Na década de 1920, dois resultados do astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889-1953) ganhariam a atenção não só das comunidades de astrônomos, mas também do grande público: *i*) a descoberta, em 1923, de que o universo era muito mais do que simplesmente a Via Láctea; *ii*) que o universo estava em expansão (1929). Nota importante: Hubble nunca acreditou neste segundo resultado seu. E nunca afirmou isso em seus artigos ou relatórios.

A expansão do universo de de Sitter – um dos poucos físicos que conheciam bem a teoria da relatividade fora da Alemanha – foi levada a sério por Georges Lemaître (1894-1966). Em 1927, esse padre belga formulou o modelo de um universo que não só se expandia, mas também tivera um início, denominado por ele “átomo primordial”.

Para a estranheza e antipatia de colegas, a conclusão reforçava um argumento teológico: “No princípio, Deus criou os céus e a Terra”. Outra antipatia: o fato de universo ter uma idade finita, algo que era difícil de digerir para grande parte da comunidade de astrônomos e astrofísicos – e mesmo cosmólogos. Adjetivos usados à época para expressar esse desabor: “dogmatismo”, “filosófico” e “monstruoso”.

A primeira reação de Einstein foi a de sempre: desconfiança em extrapolar as equações da rela-

tividade para situações extremas – como as daquele então suposto início do universo. Einstein, depois de certa resistência, aceitou o modelo de Lemaître. Já de Sitter nunca o fez.

Após sua chegada aos EUA, em 1933, Einstein publicaria seu último artigo sobre cosmologia. A partir daí, enfatizaria outro programa científico (a unificação da gravitação com o eletromagnetismo) e abraçaria causas como paz mundial, defesa das liberdades individuais e luta contra o racismo nos EUA.

Ao tomar conhecimento dos resultados de Hubble, Einstein abriu mão do termo matemático – a sua famosa constante cosmológica, Λ (lambda) – que havia incluído à força em suas equações, com o intuito de “frear” o universo. Classificou, assim, a constante cosmológica como “o maior erro” de sua carreira. Desde 1919, ele já dizia que a inclusão dessa constante era prejudicial para a “beleza” da relatividade geral. Para ele, no entanto, três pontos eram importantes em seu modelo cosmológico de 1917: *i*) a curvatura do espaço-tempo ser positiva; *ii*) ser consistente com aquilo que pregava a relatividade geral; *iii*) ser consistente com o princípio de Mach.

Lemaître tentou convencer Einstein da necessidade da constante cosmológica – da qual, agora, o autor da relatividade geral tentava se livrar. Para o padre belga, esse parâmetro deveria ser positivo, ou seja, descreveria um universo que não só se expandia, mas faria isso de forma acelerada – essa ideia seria a conclusão mais plausível de um dos resultados astrofísicos mais importantes do fim da década de 1920, o qual aventou a constante cosmológica para explicar essa aceleração.

Einstein se referiu a seu modelo cosmológico como um “castelo imponente” construído no ar. Mais: ele acreditava que seu modelo era o único possível. Portanto, os desdobramentos seguintes – os do próprio de Sitter e, anos depois, os de Friedmann – o deixariam não só surpreso, mas também cético. Daí, ele ter classificado o modelo do colega holandês como uma “brincadeira” – mais especificamente, um modelo-brinquedo, ou seja, sem vínculos com a realidade.

Por sua vez, a lei de Hubble, como ficou conhecida, estabelece que a velocidade de afastamento de um corpo cósmico é proporcional à distância dele de certo referencial (ou sistema de referência). Matematicamente, é uma lei muito simples. Essa constante, em termos básicos, relaciona a

velocidade de afastamento de um corpo cósmico (galáxia, por exemplo) com a distância em que ela se encontra de certo referencial (a Terra, por exemplo).

A constante de Hubble dá a proporcionalidade entre essas duas grandezas (velocidade de afastamento e distância), o que pode ser entendido assim: quanto mais longe uma galáxia estiver da Terra, maior será a velocidade de afastamento dela de nós.

Nas duas ou três primeiras décadas, ela foi medida com certa imprecisão. Havia muita variação – chegava a 100% – entre os valores propostos, e isso provocou problemas na interpretação dos fenômenos cósmicos, debates acalorados – afinal, era uma grandeza importante para entender o mais novo comportamento do universo. Tudo isso teve efeitos significativos na aceitação ou não de certos modelos.

Só a partir da década de 1960, essa constante passou a ser medida de modo mais confiável, graças aos avanços tecnológicos da instrumentação científica voltada à astrofísica – mas controvérsias sobre seu valor exato persistem até hoje.

Hubble, em 1927, determinou um valor de 500 km/s por megaparsec – lembrando que cada megaparsec equivale a 3,26 milhões de anos-luz. De lá para cá, esse valor foi sendo reduzido, mas os debates em torno dele só se aqueciam. Hoje, se aceita um número quase dez vezes menor, algo em torno de 70 km/s por megaparsec. Isso quer dizer: uma galáxia a 1 megaparsec de distância da Terra se afasta de nosso planeta com velocidade de 70 km/s; uma que esteja a 2 megaparsecs terá velocidade de afastamento de 140 km/s. E assim por diante.

O modelo de de Sitter e Friedmann atraiu a atenção de matemáticos, como o dos alemães Felix Klein (1849-1925) e Herman Weyl (1885-1955), bem como do italiano Tullio Levi-Civita (1873-1941), do francês Émile Borel (1871-1956), do britânico Alfred N. Whitehead (1861-1947) e do húngaro Cornelius Lanczos (1893-1974). De certa forma, essa aventura dos matemáticos no reino da relatividade geral ajudou a aumentar a áurea em relação à complexidade e à abstração da teoria. Muitos desses pesquisadores introduziram elementos filosóficos ao tratamento matemático da relatividade geral – a exemplo de Whitehead e Borel.

A relatividade geral era tema considerado “para

poucos” na década de 1920, não só por sua complexidade matemática e o fato de ela ter sido criada por um ícone como Einstein, mas também porque a nova geração de físicos que despontavam naquela década via na recém-criada – e, portanto, ainda aberta, com fronteiras a serem desbravadas – mecânica quântica o caminho mais curto para uma carreira acadêmica bem-sucedida – e para o Nobel.

A relatividade geral ficou, portanto, restrita a parte da comunidade. Ao longo das décadas (com mais ênfase a partir da década de 1940), foi, aos poucos, sugada pelo ostracismo, para ser alçada a tema significativo apenas a partir da década de 1960. Curiosamente (ou ironicamente), foi um matemático – no caso, o britânico Roger Penrose² – que contribuiu significativamente para a retomada da relatividade geral como área de pesquisa naquela década.

Nesse contexto, vale dizer que o primeiro livro sobre relatividade de um pesquisador norte-americano foi publicado cerca de 20 anos depois da formulação dessa teoria: *Relativity, thermodynamics, and cosmology*, (1932), de Richard C. Tolman (1881-1948), o que, de certa forma, mostra como, ao longo de meados da década de 1920 e na década seguinte, esse tema de pesquisa não era muito popular na comunidade de astrônomos, físicos e astrofísicos.

Alguns desses modelos feitos por matemáticos apontavam para um universo dinâmico, em evolução. Esse é o caso do artigo de Lanczos, publicado em 1922. Na década de 1920, relativistas propuseram juntar os modelos de Einstein com o de de Sitter, em um tipo de “melhor dos mundos”. A contribuição do primeiro seria a de um universo preenchido com matéria (afinal, é mais do que evidente de que ela está lá); a do segundo, daria conta da explicação do desvio para o vermelho das galáxias espirais.

Foi Lemaître, em 1925, que sugeriu que o desvio para o vermelho observado na luz das galáxias espirais fosse interpretado como efeito Doppler. Apresentado publicamente em 1842 pelo austríaco Christian Doppler (1803-1853), esse fenômeno, por exemplo, faz com que o som de uma sirene fique mais agudo quando o veículo está se aproximando de nós e mais grave quando ele se afasta.

²Penrose foi agraciado com o prêmio Nobel de Física em 2020, por seus resultados sobre buracos negros.

Para nossos propósitos aqui, podemos dizer que algo semelhante ocorre com a luz: uma galáxia que está se afastando da Terra tem sua luz ligeiramente alterada para a cor vermelha – se ela estivesse se aproximando, essa mudança seria ao azul. Essa conclusão importante de Lemaître foi, no entanto, publicada em um periódico pouco conhecido, o *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* (Bélgica).

Aspecto importante sobre o modelo de Lemaître é que a inspiração para ele nem veio da relatividade geral, nem da astronomia – e também não da teologia, como muitos acreditam. Veio, sim, da mecânica quântica e do entendimento dessa teoria sobre a radioatividade – daí, o tal “átomo primordial” ter iniciado sua desintegração (ou decaimento) por meio desse fenômeno nuclear.

Outro fenômeno que esse padre belga usou da teoria quântica foi o indeterminismo, cuja essência Einstein já havia previsto em artigo na segunda metade da década de 1910, ao estudar o fenômeno (emissão estimulada) que estaria, 40 anos depois, na base do desenvolvimento do laser.

Em resumo: o átomo primordial de Lemaître se desintegraria por meio de um decaimento radioativo, e isso não poderia ser determinado com precisão, o que, de certo modo, evitou as suposições de Immanuel Kant (1724-1804) sobre a impossibilidade de dar uma causa para o início do universo.

Inspirado pelo modelo de de Sitter, Lemaître publicaria, em 1927, seu resultado mais importante: o universo está em expansão, tem uma idade por volta de 10 bilhões de anos e um tamanho por volta de 3 mil megaparsec. Ele fez ainda uma afirmação corajosa: se o universo está em expansão, isso significa que, no passado, ele foi menor e menor. A conclusão final era a de que, em um momento remoto, toda a massa do universo deveria estar reunida em um “ponto” (o tal “átomo primordial”), ideia questionada atualmente.³ Essa afirmação causou polêmica e fez com que críticos se manifestassem – entre eles, Einstein.

Lemaître também tinha simpatia por uma classe especial de modelos cíclicos, os “explosivos”, ou seja, aqueles em que o universo “explode”, se

expande, se contrai, volta à condição de átomo primordial, se expande, se contrai... Como um tipo de fênix. Para muitos – refletindo as críticas que astrônomos faziam dos modelos da década de 1920 –, os resultados de Lemaître eram apenas abstrações matemáticas sobre o universo – com uma dose de teologia. No entanto, para o próprio Lemaître, sua ciência não tinha relevância teológica. Sua ênfase estava na física e não na matemática de seus modelos.

Quanto à expansão, é preciso lembrar que, entre 1922 e 1924, Friedmann discutiu universos que se expandiam, se contraíam ou oscilavam. E cujas idades estavam também na casa das dezenas de bilhões de anos. Esse matemático russo também mostrou que Einstein e de Sitter esgotaram todas as possibilidades para universos estacionários.⁴

Algo interessante sobre Friedmann – e, talvez, ligado ao fato de ele ser matemático: ele não enfatizou a relação de suas conclusões com a realidade. Ou seja, não defendeu que o universo estivesse realmente em expansão; ele apenas discutiu a questão como uma das possibilidades dos vários modelos matemáticos que apresentou. Isso, de certo modo, nos faz lembrar Hubble, que nunca defendeu, em seu artigo de 1929, um universo em expansão – curiosamente, os livros didáticos e históricos apontam esse norte-americano como o “pai” da expansão do universo. Até 1930, Einstein também não acreditava na expansão, mesmo depois de conhecer os resultados de Lemaître.

Hubble achou que aquilo que havia observado – o deslocamento para o vermelho da luz de galáxias – poderia ser explicado por outros motivos. Um deles seria a interferência da poeira interestelar nessa luz.

Friedmann, no entanto, foi pioneiro em mostrar que a relatividade geral oferecia outras possibilidades, além daquela em que o universo permanece estático. Outra das ironias que marcam a história da cosmologia: em 1930, Eddington mostrou que o universo “estático” de Einstein era instável, pois, caso sofresse qualquer perturbação, ele se contrairia ou se expandiria.

Em 1931, Einstein abriria mão da constante cosmológica e, no ano seguinte, publicaria, com de Sitter, um modelo em que o universo, além de aberto, tinha curvatura do espaço e constante

³Agradecemos ao árbitro do artigo que nos chamou a atenção para o fato de que, mesmo com a densidade divergindo, o universo com seção plana continua infinito.

⁴Friedmann, apesar da originalidade e radicalidade de suas ideias pioneiras, não pôde perceber os limites matemáticos destas últimas. Assim, sabe-se hoje que suas soluções são casos particulares de outras mais gerais.

cosmológica nulas. Certamente, algo que não tinha muito vínculo com o que já se conhecia do cosmo naquele momento.

Aquele início da década de 1930 ficaria caracterizado pela aceitação da expansão do universo, fenômeno que foi, à época, popularizado por livros de divulgação científica. Dois desses clássicos são *The mysterious universe* (O universo misterioso), de 1930, do astrofísico britânico James Jeans (1877-1946), e *The expanding universe* (O universo em expansão), de Eddington (1933).

De um ponto de vista certamente anacrônico, a descoberta e a aceitação de que o universo estava em expansão foi marco significativo na história da cosmologia, o qual se junta ao modelo cosmológico de Einstein, de 1917. O terceiro – personalizado na forma da descoberta, por acaso, da radiação cósmica de fundo – teria que esperar décadas e daria impulso à cosmologia observacional e corroboraria, para grande parte da comunidade científica, o modelo que até hoje é o mais aceito, o Big Bang.

Os modelos que surgiram ao longo da década de 1920 foram marcados não só por grande matematização e geometrização do universo, mas também por um afastamento dos elementos metafísicos que caracterizaram a cosmologia até o século 19 – talvez, uma das exceções tenham sido as leituras equivocadas (teológicas) feitas sobre o “átomo primordial” de Lemaître.

Foi ao longo da década de 1920 que surgiu o tratamento matemático que permitiu descrever universos isotrópicos (ou seja, sem uma direção privilegiada para as leis da física), com distribuição homogênea de matéria e os quais ou se expandiam, ou se contraíam – por sinal, pressupostos até hoje empregados em modelos cosmológicos denominados universo oscilante (ou bouncing universe).

O ferramental teórico que permitiu esses avanços é denominado métrica de Robertson, referência ao matemático norte-americano Howard Robertson (1903-1961), cujas ideias foram ampliadas na década seguinte. Robertson deu início a uma ferramenta matemática que permitiu satisfazer o princípio cosmológico – ou seja, em escalas suficientemente grandes, as leis do universo são as mesmas para todos os observadores, independentemente de quem eles sejam e onde estejam. Vale ressaltar que foram seus trabalhos iniciais, juntamente com os de Lemaître, que chamaram

a atenção dos especialistas à época para os resultados de Friedmann do início da década de 1920.

Em meados da década de 1930, a cosmologia era uma área de pesquisa praticada internacionalmente, tanto na Europa (Alemanha, Bélgica, Holanda) quanto na União Soviética e nos EUA. Se ela era propriamente uma ciência, permanecia questionável para alguns. E seus avanços ainda se davam um pouco “aos trancos” e por trajetórias “curvas”, com retornos sucessivos a pontos que essa área havia abandonado.

A década de 1930 foi, para a cosmologia, um tanto quanto confusa, com a agravante de que a metafísica estaria novamente presente nos debates e modelos, mas sempre evitando o tema relacionado à idade do universo – a aceitação de que o universo se expandia não levou à aceitação de que ele deveria ter uma origem temporal, o que soa paradoxal, certamente.

Na verdade, nas primeiras três décadas do século passado, a idade do universo não era uma questão muito discutida entre cosmólogos, astrofísicos e astrônomos – era quase um tabu. Também permaneceriam em aberto questões sobre a finitude (ou não) espacial.

Mas foi na década de 1930 que começaria, com mais intensidade, a aliança da cosmologia com a astronomia observacional. Apesar de conturbada, foi dessa associação que surgiram os ali-cerces para grandes avanços no período após a Segunda Guerra Mundial.

Sobre os autores

Antonio Augusto Passos Videira (guto@cbpf.br) é Doutor em Filosofia da Ciência pela Universidade de Paris VII (Denis Diderot). É professor titular da UERJ, além de professor no Programa de Ensino e História da Matemática da UFRJ. Professor convidado no Instituto de Biofísica (UFRJ) e pesquisador colaborador no CBPF.

Cássio Leite Vieira (cleitevieira@gmail.com) é Doutor em História da Ciência pela UFRJ, jornalista freelancer especializado na cobertura de ciências exatas e historiador da física.

Referências

- [1] C. Smeenk, *Einstein's Role in the Creation of Relativistic Cosmology*, in *The Cambridge*

- Companion to Einstein*, editado por M. Janssen e C. Lehner (Cambridge University Press, 2014), Cambridge Companions to Philosophy, 228–269.
- [2] P. Coles (ed.), *The Routledge Companion to The New Cosmology* (Routledge, Londres, 2001), 2 ed.
- [3] N. S. Hetherington (ed.), *Cosmology - Historical, Literary, Philosophical, Religious, and Scientific Perspectives*. (Garland Publishing, New York, 1993).
- [4] H. Kragh, *The controversial universe: a historical perspective on the scientific status of cosmology*, *Physics and Philosophy*, 008 (2007).
- [5] H. Kragh, *Conceptions of Cosmos: From Myths to the Accelerating Universe: A History of Cosmology*. (Oxford University Press, Oxford, 2013).

Alexander Friedmann e o universo em expansão

V. M. Mostepanenko

Observatório Astronômico em Pulkovo – Academia de Ciências da Rússia
Universidade Politécnica de São Petersburgo "Pedro, o Grande"
Universidade Federal de Kazan

Resumo

Nesta nota, apresentamos brevemente os principais fatos da biografia de Alexander Friedmann, o matemático e físico russo que previu a expansão do Universo há cem anos. O papel desta previsão para a ciência moderna e para nossa imagem do mundo é discutido com uma ênfase na mudança radical em nossos conceitos básicos introduzidos pela previsão de Friedmann e sua confirmação experimental.

Abstract

In this note, we briefly present the main facts from the biography of Alexander Friedmann, the Russian mathematician and physicist who predicted the expansion of the Universe one hundred years ago. The role of this prediction for modern science and for our picture of the World is discussed with a stress on the radical change in our basic concepts introduced by Friedmann's prediction and its experimental confirmation.

Palavras-chave: Alexander Friedmann, história da física, cosmologia, universo em expansão

Keywords: Alexander Friedmann, history of physics, cosmology, expanding universe

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37440](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37440)

O mistério do céu noturno coberto por estrelas sempre atraiu a atenção dos povos. Este mistério foi uma das principais fontes para mitos, diferentes religiões e conceitos filosóficos, e no período antigo da história da humanidade pavimentou a explicação científica do universo.

A primeira visão científica do universo foi formulada por Ptolomeu no primeiro século da nossa era. De acordo com Ptolomeu, a Terra localiza-se no centro do mundo orbitada pelos cinco planetas conhecidos na época, além da Lua e o Sol. O sistema geocêntrico de Ptolomeu prevaleceu até o século XVI quando foi substituído pelo sistema heliocêntrico de Copérnico, Kepler e Galileu onde os cinco planetas orbitam o Sol enquanto a Lua orbita a Terra. Tanto a visão de universo de Ptolomeu quanto de Copérnico admitiam que além de Saturno havia o firmamento com as estrelas fixas e estas não obedeciam as mesmas leis físicas que os corpos na Terra.

Na visão de universo de Newton, o firmamento foi substituído por um espaço infinitamente grande, homogêneo e isotrópico. De acordo com Newton, o universo existia para sempre e contendo um número infinito de estrelas. O mo-

delo cosmológico criado por Einstein no arca-bouço da sua teoria da relatividade geral com a inclusão da constante cosmológica fez algumas correções na visão de universo de Newton. De acordo com Einstein, o universo tem um volume espacial finito. Ele nunca foi criado, nunca morrerá e contém um número finito de estrelas.

Todas as visões de universo anteriores de Ptolomeu, Copérnico, Newton e Einstein são estáticas, ou seja, independentes do tempo. Apenas Alexander Friedmann, em 1922, fez uma mudança conceitual importante em nossa visão de mundo ao predizer que o universo poderia estar se expandindo.

Alexander Friedmann nasceu em São Petersburgo, Rússia, em 16 de Junho de 1888, em uma família de artistas [1,2]. Seu pai, de mesmo nome Alexander Friedmann, foi um compositor e artista do Balé do Teatro Imperial. Sua mãe, Lyudmila Voyachek, formou-se pianista pelo Conservatório de São Petersburgo. Assim, nada indicava que seu filho estudaria matemática e física e se tornaria um grande cientista. Em 1897, os pais de Alexander Friedmann se separaram e ele permaneceu com seu pai nos anos que se seguiram.

Neste mesmo ano, ele ingressou na "Segunda Escola de São Petersburgo" que era uma das mais antigas instituições de ensino da Rússia, contando com bons professores de matemática e física.

Ainda enquanto aluno, em colaboração com seu colega de classe Yakov Tamarkin que posteriormente tornou-se um matemático famoso, Alexander Friedmann escreveu seu primeiro artigo dedicado aos números de Bernoulli o qual foi publicado em 1906 na revista *Mathematische Annalen* sob a recomendação de David Hilbert.

Depois de sua graduação na "Segunda Escola" em 1906, com medalha de ouro, Alexander Friedmann foi aceito no curso do Departamento de Matemática na Faculdade de Física e Matemática da Universidade de São Petersburgo. Durante os seus anos universitários, Alexander Friedmann recebeu uma educação fundamental em diferentes áreas tanto da matemática quanto da física, com brilhante desempenho. Seus resultados nos cursos sempre foram marcados pela avaliação "excelente".

Em 1910, Alexander Friedmann graduou-se pelo Departamento de Matemática e permaneceu nessa instituição para uma vaga de pesquisa na pós-graduação e preparação para assumir o cargo de professor pelo mesmo departamento, sempre sob a supervisão do famoso matemático Vladimir Steklov. Durante os anos 1910-1913, Alexander Friedmann pesquisou vários problemas de física e matemática, publicou vários artigos e ministrou cursos para estudantes. Ele foi aprovado com sucesso nos exames para grau de mestrado mas formalmente defendeu sua dissertação apenas em 1922 quando já era professor, inicialmente na Universidade de Perm (1918-1920) e posteriormente, de 1920 a 1925, no Instituto Politécnico de Petrogrado e no Instituto de Engenharia Férrea, ambos da Universidade de Petrogrado (também conhecida com Universidade de São Petersburgo).

A partir de 1913 Alexander Friedmann iniciou seu trabalho no Observatório de Física de São Petersburgo (posteriormente renomeado de Geofísico). Este trabalho revelou seu interesse por meteorologia, dinâmica, hidrodinâmica e aerodinâmica temas nos quais obteve uma série de resultados fundamentais que são muito difundidos até hoje entre os especialistas da área. Uma parte desses resultados foram obtidos durante sua estada na Universidade de Leipzig, Alemanha, na primeira metade de 1914.

Depois do início da Primeira Guerra Mundial em agosto de 1914, Alexander Friedmann se voluntariou para a aeronáutica do império russo. Seus serviços no exército duraram por três anos. Durante este período de sua vida, Alexander Friedmann organizou o serviço aerológico, criou a teoria de bombardeio e mostrou, em diversas situações, exemplos de bravura e heroísmo, como ao pessoalmente pilotar aeronaves e bombardear com sucesso as posições alemãs em Przemyśl. As façanhas de Alexander Friedmann durante a guerra foram premiadas com várias condecorações militares de alto nível, como por exemplo pela condecoração "Georgii Cross", uma das mais importantes condecorações militares do então império russo.

Os últimos anos da vida de Alexander Friedmann, a partir de 1920 até 16 de Setembro de 1925, quando ele morreu de forma trágica decorrente de tifo aos 37 anos de idade, foram extremamente produtivos. Durante estes anos, ele obteve vários resultados científicos extraordinários na área de meteorologia dinâmica (em 1925 ele tornou-se diretor do observatório geofísico da academia russa de ciência), e também escreveu dois artigos [3, 4] sobre a teoria da relatividade geral que tornou o seu nome imortal.¹

No primeiro destes artigos [3], Alexander Friedmann resolveu as equações de Einstein da teoria da relatividade geral para o caso de um espaço homogêneo e isotrópico com curvatura positiva. Diferentemente de Einstein, Alexander Friedmann não fez nenhuma hipótese adicional e, em particular, não impôs a princípio que o universo fosse estático. Ele se comportou como um matemático, procurando verificar quais informações estão contidas nas equações fundamentais da teoria da relatividade geral independente de nossas preferências. Einstein, havia incluído especificamente o termo cosmológico nas suas equações com a finalidade de obter um universo estático. Mas, de acordo com o resultado de Alexander Friedmann, mesmo na presença de uma constante cosmológica, as equações de Einstein apresentam soluções não-estáticas, enquanto as soluções estáticas obtidas por Einstein são apenas um caso muito particular. Em 1924, Alexander Friedmann publicou um resultado similar para o caso de um

¹Nota do editor: o primeiro destes artigos, escrito em 1922, encontra-se traduzido na presente edição dos Cadernos de Astronomia.

espaço homogêneo e isotrópico com curvatura negativa [4].

Acima de tudo, Alexander Friedmann provou que, ao contrário das afirmações anteriores de Einstein, existem soluções cosmológicas das equações da teoria da relatividade geral sem o termo cosmológico e todas elas descrevem universos não-estáticos que se expandem ou se contraem com o tempo. No início, Einstein não concordou com estes resultados e publicou uma nota [5] afirmando que as soluções encontrados por Friedmann não satisfaziam as equações de campo. No entanto, depois das explicações por escrito de Alexander Friedmann, encaminhadas a ele pessoalmente pelo prof. Yu. A. Krutkov, Einstein publicou uma outra nota [6] onde reconheceu que suas críticas “eram baseadas em um erro nos cálculos”.

Assim, de acordo com a previsão de Alexander Friedmann, nosso universo não pode ser estático mas deve estar em expansão. Esta previsão foi confirmada experimentalmente, primeiramente em 1927 por Georges Lemaître [7] e depois, em 1929, por Edwin Hubble [8], ambos utilizando o desvio para o vermelho no espectro de galáxias distantes. Mais recentemente, esses resultados foram confirmados por Penzias e Wilson [9] que descobriram, em 1964, a radiação cósmica de fundo em micro-ondas, e por todos os desenvolvimentos subsequentes da astrofísica relativística e cosmologia.

De volta ao início desta breve nota, podemos concluir que a predição da expansão do universo por Alexander Friedmann mudou completamente nossa visão de mundo em comparação com a que prevaleceu em todas as épocas anteriores. Lembrando que o universo como um todo é o objeto mais impressionante, misterioso e grandioso da natureza, e que causa um imenso impacto tanto na vida humana quanto na filosofia humana, esta descoberta coloca Alexander Friedmann em par com os maiores cientistas da história da humanidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela Universidade Politécnica de São Petersburgo "Pedro o Grande" no âmbito do projeto do estado russo para pesquisa básica (projeto nº FSEG-2020-0024) e pelo Programa de Liderança Acadêmica Estratégica da Universidade Federal de Kazan.

Nota dos editores: O texto em português é uma tradução, realizada por Felipe Tovar Falciano, do texto original em inglês escrito especialmente para os Cadernos de Astronomia.

Sobre o autor

Vladimir M. Mostepanenko (vmos-tepa@gmail.com) é professor na Universidade Politécnica de São Petersburgo "Pedro o Grande", Rússia, e é especialista em gravitação, teoria quântica de campos e cosmologia. Publicou quase 200 artigos científicos e é também autor de livros científicos. Tem dado importante contribuições em problemas relacionados a efeitos quânticos em gravitação e para os estudos do efeito Casimir. É um dos criadores e coordenadores dos *Friedmann's seminars*, evento científico internacional que ocorre bi-anualmente desde 1989.

Referências

- [1] V. Frenkel, *Aleksandr Aleksandrovich Fridman (Friedmann): a biographical essay*, *Sov. Phys. Usp* **31**(7), 645 (1988).
- [2] E. A. Tropp, V. Y. Frenkel e A. D. Chernin, *Alexander A. Friedmann: The man who made the universe expand* (Cambridge University Press, Nova York, 1993).
- [3] A. Friedmann, *Über die krümmung des raumes*, *Z. Physik* **10**, 377 (1922).
- [4] A. A. Friedmann, *Über die möglichkeit einer welt mit konstanter negativer krümmung des raumes*, *Z. Physik* **21**, 326 (1924).
- [5] A. Einstein, *Bemerkung zu der arbeit von A. Friedmann "Über die krümmung des raumes"*, *Z. Physik* **11**, 326 (1922).
- [6] A. Einstein, *Notiz zu der bemerkung zu der arbeit von A. Friedmann "Über die krümmung des raumes"*, *Z. Physik* **18**, 228 (1923).
- [7] G. Lemaître, *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* **47**, 49 (1927).

- [8] E. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **15**(3), 168 (1929).
- [9] A. A. Penzias e R. W. Wilson, *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s.*, *Astrophysical Journal* **142**, 419 (1965).

Supernovas do tipo Ia e a expansão do Universo

Ribamar R. R. Reis^{1,2} e Beatriz B. Siffert³

¹Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

²Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro

³Campus Duque de Caxias, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

A aplicação de supernovas do tipo Ia como velas padrão para a medida de distâncias no Universo revolucionou a cosmologia na década de 90. A constatação de que supernovas distantes pareciam menos brilhantes do que o esperado levou à construção da hipótese da expansão acelerada do Universo, atualmente parte fundamental do modelo padrão da cosmologia. Neste artigo, iniciaremos com uma revisão dos principais marcos na descrição de supernovas, desde a sua classificação moderna até a construção das hipóteses que levaram à concepção dos levantamentos SCP e *High-Z*, cujos resultados foram as primeiras evidências da expansão acelerada. Em seguida, apresentaremos a análise cosmológica realizada e os procedimentos para a padronização das curvas de luz adotados. Descreveremos também os principais levantamentos de supernovas já conduzidos e as diferentes amostras resultantes e finalizaremos comentando sobre os atuais desafios e perspectivas da área.

Abstract

The use of type Ia supernovae as standard candles to measure distances in the Universe has established a turning point in cosmology in the end of the last century. The experimental fact that distant supernovae appeared less bright than nearby ones, lead to the construction of the accelerated expansion model, currently part of the standard cosmological model. In the present paper we will start by reviewing the main landmarks in the application of type Ia supernovae in cosmology, from their modern classification to the construction of the hypotheses behind the conception of the SCP and the *High-Z* surveys, which resulted in the first evidence for the accelerated expansion. We will then present the procedure for light curve standardization, required for the application of these supernovae in cosmology, which will be followed by the description of the main supernova surveys conducted so far and the resulting data samples. We will finish by commenting on the current main challenges in the field and how future surveys can help overcoming them.

Palavras-chave: supernova, vela padrão, cosmologia, energia escura.

Keywords: supernova, standard candle, cosmology, dark energy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37130](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37130)

1 Introdução

Um dos pilares da cosmologia moderna, a ideia de que o Universo está em expansão, se consolidou na primeira metade do século XX, com a contribuição fundamental dos estudos de Lemaître [1, 2] e das observações feitas por Hubble [3]. Lemaître deduziu teoricamente e Hubble inferiu a partir de observações de galáxias a conhecida lei de Hubble-Lemaître, que determina que a velocidade com que os objetos no Universo se afastam uns dos outros é proporcional à distância entre eles. Para obter seu resultado, Hubble utilizou dois conceitos importantes: o efeito Doppler, no qual o comprimento de onda, ou frequência, observado de uma onda (eletromagnética, no caso)

muda de acordo com a velocidade da fonte com respeito ao observador, dando origem ao chamado desvio para o vermelho; e a distância de luminosidade, que é obtida a partir do fluxo (energia por unidades de tempo e área) e da luminosidade (energia por unidade de tempo) da fonte. Portanto, de acordo com a lei de Hubble-Lemaître, quanto maior o desvio para o vermelho de um objeto, maior é a velocidade com a qual ele se afasta de nós e maior é a sua distância.

Para obter a distância de luminosidade em função do desvio para o vermelho, Hubble usou estrelas variáveis cefeidas, cuja luminosidade média pode ser calculada, pois é proporcional ao período de oscilação da própria luminosidade, propriedade descoberta por Henrietta Leavitt [4, 5].

Infelizmente, cefeidas não podem ser observadas a distâncias além do Grupo Local de galáxias, ao qual pertence a Via Láctea. Para obter informações sobre parâmetros cosmológicos usando esse tipo de abordagem seria necessário encontrar uma classe de objetos ou eventos astronômicos muito mais brilhantes. Isso motivou o estudo de supernovas para esse fim.

Uma supernova (SN) é uma explosão que ocorre no estágio final da evolução de algumas estrelas ou sistemas de estrelas. Existem vários tipos de SN e elas são tipicamente classificadas de acordo com as características observadas nos seus espectros, que são medidas de fluxo específico (energia por unidades de tempo, área e comprimento de onda) em função do comprimento de onda, e nas suas curvas de luz, que são medidas de fluxo em função do tempo. Enquanto o espectro de um corpo celeste carrega informação sobre a distribuição da sua emissão em diferentes porções do espectro eletromagnético, a sua curva de luz nos mostra a evolução da sua emissão de radiação com o tempo. Em geral, curvas de luz são obtidas quando a radiação recebida passa por um filtro no telescópio. Esse tipo de observação é conhecido como “fotometria” e dá informação sobre a emissão em toda a faixa de comprimento de onda permitida pelo filtro utilizado. Em observações espectroscópicas (espectroscopia), em contraste, é possível obter informação sobre a emissão em cada comprimento de onda individual, o que permite a visualização de linhas de emissão e absorção dos elementos e moléculas que compõem o objeto. Através da observação de tais linhas é possível calcular diretamente o desvio para o vermelho do objeto.

Primeiramente, as supernovas foram divididas em tipo I, que não apresentam linhas de hidrogênio nos seus espectros, e tipo II, que as apresentam. As SN do tipo I, por sua vez, são divididas entre as do tipo Ia, que apresentam linha de silício II (uma vez ionizado) no espectro e as que não possuem essa característica, tipos Ib e Ic. As SN do tipo II são, em geral, classificadas de acordo com a forma das suas curvas de luz. Do ponto de vista da estrela ou sistema que sofre a explosão, temos uma distribuição diferente. As SN do tipo II, Ib e Ic ocorrem devido ao colapso gravitacional de estrelas massivas (acima de 8 vezes a massa do Sol), enquanto as SN Ia têm origem na explosão termonuclear de estrelas anãs bran-

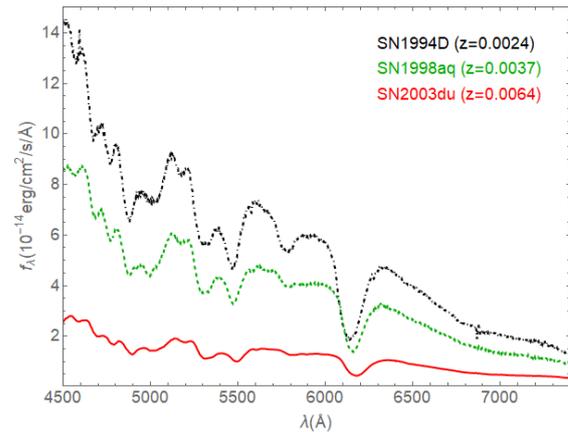


Figura 1: Exemplos de espectros de supernovas Ia observados 4 dias após o máximo de brilho. As curvas representam as supernovas SN2003du (vermelha contínua), SN1998aq (verde pontilhada) e SN1994D (preta ponto-tracejada). Dados obtidos de [6].

cas em sistemas binários. O fato de haver um limite máximo para a massa de uma anã branca (1,4 vezes a massa do Sol) faz com que todas as explosões de SN Ia sejam muito similares entre si, quando comparadas com os outros tipos de SN, e essa homogeneidade é fundamental para a sua aplicabilidade em cosmologia, como veremos na próxima seção. A Figura 1 mostra exemplos de espectros de SN Ia em diferentes desvios para o vermelho (ou seja, a diferentes distâncias da Terra), enquanto a Figura 2 ilustra a classificação das SN e as principais características de cada tipo. A Figura 3 mostra um sistema de filtros bastante usado na observação de SN próximas, o UBVRI. Cada curva representa a porcentagem da energia incidente que atravessa o filtro em função do comprimento de onda e está normalizada para ser 100% no pico. A Figura 4 mostra curvas de luz no filtro B, um dos filtros apresentados na Figura 3, para três SN Ia. Podemos ver como todas têm uma forma bastante semelhante.

2 O uso de supernovas como velas padrão

Como mencionamos anteriormente, uma maneira de estimar a distância de uma fonte é através da distância de luminosidade, que é definida como

$$d_L = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}, \quad (1)$$

onde F é o fluxo que recebemos na câmera do telescópio e L a luminosidade da fonte, conforme

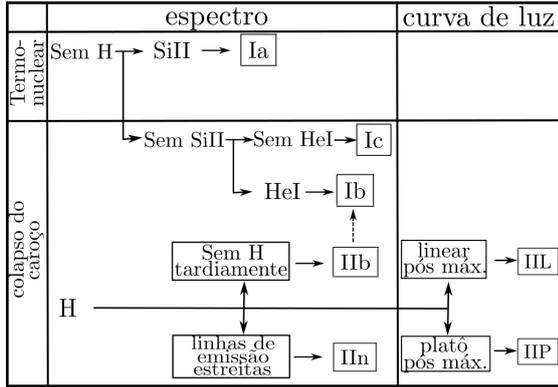


Figura 2: Classificação dos tipos mais comuns de supernovas. Figura retirada de [7], com a permissão de *IOP publishing*, por intermédio de *Copyright Clearance Center, Inc.*, e traduzida pelos autores.

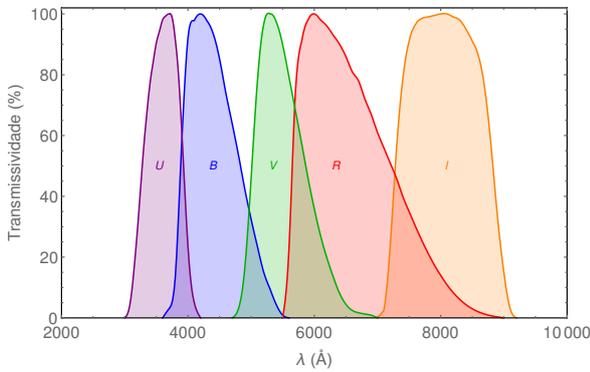


Figura 3: Curvas de transmissão do sistema de filtros UBVR. Figura adaptada de [7], com a permissão de *IOP publishing*, por intermédio de *Copyright Clearance Center, Inc.*

medida por um observador a 10 parsecs¹ de distância e em repouso com relação a ela.

Para que possamos usar a Eq. (1) para estimar a distância de uma fonte a partir do fluxo observado, precisamos ter uma estimativa da sua luminosidade. Naturalmente, não podemos nos aproximar a uma distância de 10 parsecs de cada fonte para medir essa quantidade e, por isso se torna útil o conceito de velas padrão, que consistem em classes uniformes de fontes, todas com a mesma luminosidade. Dessa forma, poderíamos obter medidas de luminosidade de fontes próximas (com distâncias medidas através de outros métodos) e usá-las para as fontes distantes.

O uso de supernovas como velas padrão remonta à década de 1960, quando Kowal [8] usou uma amostra de supernovas do tipo I para estimar distâncias de luminosidade. Atualmente,

¹O parsec é uma unidade de distância comum em astronomia e equivale a $3,086 \times 10^{13}$ km.

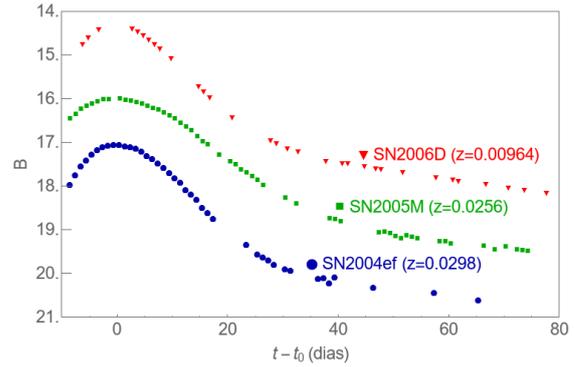


Figura 4: Exemplos de curvas de luz no filtro B de supernovas Ia. Figura retirada de [7], com a permissão de *IOP publishing*, por intermédio de *Copyright Clearance Center, Inc.* e traduzida pelos autores.

sabemos que esses eventos não são rigorosamente velas padrão, apresentando variações não desprezíveis nas suas luminosidades o que, consequentemente, afetam a medida de distância obtida. No entanto, eles pareciam candidatos promissores ao que podemos chamar de “velas padronizáveis”, para as quais podemos descrever tais variações em termos de um modelo e usá-lo para obter estimativas mais precisas. Um breve histórico desse período inicial do uso de supernovas em cosmologia pode ser encontrado em [9, 10].

Em astronomia, a medida de brilho mais utilizada é a chamada “magnitude”, que está relacionada com o logaritmo do fluxo de um corpo celeste. Chamamos de “cor” (ou, à rigor, “índice de cor”) a diferença entre as magnitudes de um objeto medidas com dois diferentes filtros. A cor (B-V) de um objeto é, por exemplo, a diferença entre as magnitudes desse objeto medidas com os filtros B e V. Uma importante contribuição para o processo de padronização de SN Ia foi o trabalho de Mark Phillips em 1993 [11], que encontrou fortes correlações entre o fluxo máximo, a taxa de decaimento da curva de luz após o máximo e a cor (B-V) das SN Ia. Phillips também verificou que as correlações entre o fluxo máximo e a taxa de decaimento eram maiores quando usava dados no filtro B. Em geral, SN Ia mais brilhantes, são mais azuis (brilham mais no filtro B, cuja inicial, de fato, se refere à palavra em inglês *blue*) e demoram mais para se apagar. Usando essas correlações é possível ajustar as curvas de luz e melhorar a precisão das distâncias obtidas. Desde então, abriu-se um novo campo de estudo dos chamados métodos de ajuste de curva de luz, que exploram essas correlações e outras descobertas mais tarde.

Dentre os vários métodos de ajuste de curva de luz, podemos destacar:

- Δm_{15} [11–13], em que o parâmetro que dá nome ao método representa a variação da magnitude no intervalo de 15 dias a partir do máximo.
- *Stretch* [14], em que o eixo temporal é multiplicado por um fator para expandir ou contrair a curva de luz na direção horizontal. Uma implementação simples dessa ideia pode ser encontrada em [7]. A Figura 5, retirada dessa referência, ilustra o efeito do ajuste.
- *Multicolor Light Curve Shape* (MLCS) [15, 16], que estende a proposta do Δm_{15} introduzindo um ajuste simultâneo em vários filtros e usando o módulo de distância $\mu = 5 \log [d_L / (10 \text{ pc})]$ como um parâmetro a ser ajustado, tornando esse método um estimador de distância. Além disso, alguns parâmetros do modelo precisam ser determinados *a priori* a partir de uma amostra de treinamento formada por SN Ia próximas.
- *Spectral Adaptive Lightcurve template* (SALT) [17, 18], que segue a ideia do *stretch*, usando como ponto de partida a média, e desvios de primeira ordem em torno dela, do fluxo específico em função do comprimento de onda e do tempo. Essas funções são estimadas a partir de uma amostra de treinamento, procedimento fundamental para a precisão e acurácia do modelo, que é objeto de estudo até hoje (veja, por exemplo, [19–21]). Este é o método mais usado pela comunidade atualmente.

3 Qual é a relação entre supernovas e aceleração cósmica?

Como vimos anteriormente, é possível usar métodos de padronização para estimar a distância de SN Ia. Com isso, podemos confrontar essas medidas com os valores esperados, assumindo um modelo teórico. O modelo que consideramos padrão supõe que a gravitação é descrita pela teoria da relatividade geral e que a matéria e a energia no Universo são distribuídas de forma homogênea

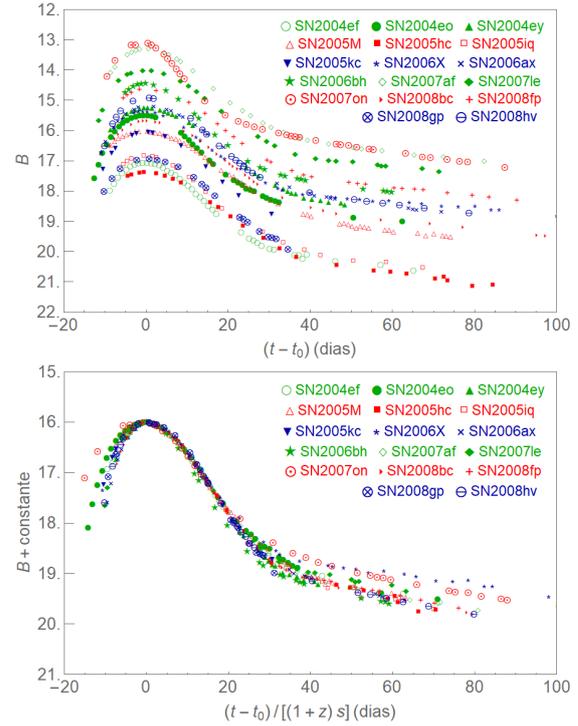


Figura 5: Curvas de luz no filtro B de supernovas Ia conforme observadas (acima) e depois de corrigidas pela distância, desvio para o vermelho e *stretch* (abaixo). As curvas também foram deslocadas na vertical para coincidir no máximo. Figuras retiradas de [7], com a permissão de IOP publishing, por intermédio de Copyright Clearance Center, Inc., e traduzidas pelos autores.

(não variam com a posição) e isotrópica (não dependem da direção em que são observadas). Sabemos que a distribuição não é exatamente homogênea e isotrópica, como indica a existência de estruturas como galáxias e aglomerados, mas esta é uma boa aproximação em escalas suficientemente grandes. De fato, o Universo pode ser considerado homogêneo e isotrópico se considerarmos regiões maiores do que 100 Mpc (megaparsecs, ou milhões de parsecs), que correspondem a dezenas de vezes o tamanho de um aglomerado de galáxias típico. Com essas hipóteses, podemos calcular a previsão do modelo para a relação entre distância de luminosidade e o desvio para o vermelho, para cada configuração dos “ingredientes” que compõem o Universo, como matéria não relativística (formada por componentes que se movem com velocidade muito menor que a luz, como a matéria comum e a matéria escura), radiação (eletromagnética e neutrinos) e a chamada energia escura.

No contexto da relatividade geral, é possível mostrar que, em um universo em expansão com-

posto por matéria não relativística e radiação, a expansão cósmica é sempre desacelerada. Para produzir uma aceleração nessa classe de modelos é preciso adicionar algum componente extra com uma característica pouco usual, pressão negativa. É a esse tipo de componente que nos referimos quando usamos o termo energia escura. A expressão “escura” se refere ao fato de não termos detectado esse componente em observações astronômicas, o que indica que ele não deve interagir com radiação eletromagnética, que é a base dessas observações.

Existem várias propostas para descrever a natureza da energia escura na literatura (veja, por exemplo, [22] e suas referências), mas a mais simples de todas é a própria constante cosmológica Λ , introduzida originalmente por Einstein com um intuito diferente, e que pode ser descrita como um fluido com pressão negativa e , em módulo, igual à sua densidade de energia. É comum em cosmologia usarmos o termo “equação de estado” para se referir à relação entre a pressão p e a densidade de energia de um fluido ρ . É comum também definirmos o parâmetro da equação de estado

$$w = \frac{p}{\rho}. \quad (2)$$

No caso da constante cosmológica, portanto, temos $w = \text{constante} = -1$.

É de praxe expressar as quantidades relativas de cada ingrediente de matéria e energia em um modelo para o Universo através do que chamamos de “parâmetro de densidade”, definido como

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}, \quad (3)$$

onde ρ_c é a densidade total (chamada crítica) necessária para que o Universo tenha curvatura exatamente zero. Conhecendo a equação de estado, podemos determinar como o parâmetro de densidade de cada componente evolui com o desvio para o vermelho. Os valores atuais desses parâmetros (Ω_{m0} para a matéria, Ω_{r0} para a radiação e $\Omega_{\Lambda0}$ para a constante cosmológica) ficam em aberto, como parâmetros livres do modelo, a serem determinados a partir das observações. A Figura 6 mostra a dependência da distância de luminosidade com o desvio para o vermelho para duas diferentes configurações de universo: $\Omega_{m0} = 1$, $\Omega_{r0} = 0$ e $\Omega_{\Lambda0} = 0$ (curva tracejada) e $\Omega_{m0} = 0,3$, $\Omega_{r0} = 0$ e $\Omega_{\Lambda0} = 0,7$ (curva com linha contínua). Com isso, as medidas de distância

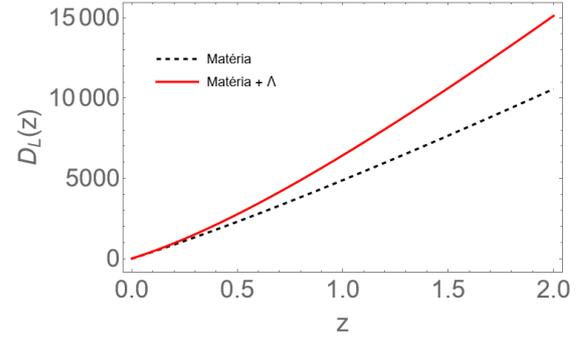


Figura 6: Distância de luminosidade (em megaparsecs) em função do desvio para o vermelho. A curva preta tracejada representa um universo com apenas matéria não relativística e a curva contínua vermelha representa o modelo padrão atual, com matéria e constante cosmológica.

das SN Ia nos permitem obter estimativas para esses parâmetros, quando as confrontamos com as curvas teóricas. É importante notar que as curvas coincidem para pequenos valores de distância, ou desvio para o vermelho, o que torna fundamental procurar por objetos ou eventos suficientemente brilhantes para possam ser observados a grandes distâncias. De fato, SN Ia são explosões extremamente brilhantes, e podem atingir bilhões de vezes o brilho do Sol sendo, portanto, visíveis a grandes distâncias.

É comum descrever a aceleração da expansão através do chamado parâmetro de desaceleração

$$q = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}, \quad (4)$$

onde a é o fator de escala, uma função que indica quanto as distâncias mudam com o tempo devido à expansão. A distância entre dois objetos em um dado instante é dada pela distância entre eles hoje multiplicada pelo fator de escala no mesmo instante. Os pontos sobre a grandeza representam derivadas com relação ao tempo, um ponto para primeira derivada e dois para segunda. Como vimos antes, no contexto de relatividade geral com a matéria que conhecemos, é esperado que a expansão seja desacelerada. Por isso optou-se por definir o parâmetro de tal maneira que $q > 0$ indique desaceleração. O valor do parâmetro de desaceleração hoje, q_0 , pode ser escrito em termos dos parâmetros de densidade como

$$q_0 = \frac{\Omega_{m0}}{2} - \Omega_{\Lambda0}. \quad (5)$$

Os primeiros trabalhos nessa área estavam empenhados em estimar o valor de q_0 . Em 1998,

a colaboração *High-Z Supernova Search*, usando uma amostra com 50 SN Ia, concluiu que $q_0 < 0$, ou seja, a expansão é acelerada, com pouco mais de 99% de confiança [23]. No ano seguinte, a colaboração *Supernova Cosmology Project* (SCP) obteve, de maneira independente e com uma amostra diferente com 42 SN Ia, um resultado semelhante [24].

O trabalho das colaborações SCP e *High-Z* se beneficiou enormemente dos resultados da colaboração *Calán/Tololo supernova survey*, que gerou uma amostra com cerca de 30 SN Ia próximas (com desvio para o vermelho até $z \sim 0.1$) [12]. Essa amostra foi fundamental para a melhoria da calibração das estimativas de distância de SN Ia e foi incluída na análise de ambos os grupos.

4 Levantamentos de supernovas

Os artigos originais das colaborações SCP e *High-Z*, no final da década de 90, analisaram amostras com um total de aproximadamente 60 supernovas do tipo Ia com desvios para o vermelho de 0,16 a 0,97, o que corresponde a uma faixa de distâncias de luminosidade de aproximadamente 770 Mpc a 6500 Mpc. Considerando que o diâmetro do Grupo Local de galáxias é de ~ 3 Mpc, e a distância até o aglomerado de Virgo, o maior da nossa vizinhança, é de ~ 20 Mpc, podemos vislumbrar o quão distantes estavam essas explosões.

A base de dados *Transient Name Server*,² que é atualmente usada para registrar novos eventos transientes, contém quase 9000 supernovas do tipo Ia. De acordo com a base de dados *Open Supernova Catalog*,³ [6] que se propõe a compilar supernovas de diferentes fontes, existem mais de 16000 supernovas do tipo Ia conhecidas, com desvios para o vermelho de até 2,2. No entanto, apenas aproximadamente 1/8 delas possui medidas do espectro e 1/3 delas não possui medidas de espectro e nem da curva de luz.

De fato, após a descoberta da aceleração cósmica, foram iniciados diversos levantamentos com o objetivo exclusivo de detectar supernovas do tipo Ia. Além disso, a detecção desse tipo de supernova passou a ocupar posição privilegiada dentre os objetivos científicos dos grandes levantamentos cosmológicos desde então.

Os primeiros levantamentos do século XXI dedicados exclusivamente à detecção de supernovas do tipo Ia foram o *Supernova Legacy Survey* (SNLS) [25] e o *Equation of State: SuperNova trace Cosmic Expansion* (ESSENCE) [26], que incluíam muitos membros das colaborações SCP e *High-Z* respectivamente.

O SNLS foi parte de um projeto maior chamado *Canada-France-Hawaii Telescope Legacy Survey* (CFHTLS),⁴ realizado com o telescópio *Canada-France-Hawaii* (CFHT) de 3,6 m de diâmetro, no Havaí. Entre 2003 e 2006, o SNLS detectou ~ 250 supernovas do tipo Ia com $z \leq 1$, ao observar periodicamente uma porção do céu correspondente a 20 vezes a área ocupada pela Lua cheia, com 4 filtros de banda larga [19].

Observações periódicas de uma mesma região do céu são fundamentais para a detecção de supernovas de qualquer tipo, de outros objetos de brilho variável e até mesmo de objetos que se movem, como asteroides. Isso porque a procura por tais objetos é realizada através da comparação de imagens do céu obtidas em diferentes noites, a fim de detectar alterações no brilho ou posição dos objetos em cada uma delas.

O SNLS realizou observações com periodicidade (ou, como costumamos chamar, *cadência*) de 3 a 4 dias. Já o levantamento ESSENCE, realizado com o telescópio *Blanco*, com 4 m de diâmetro, localizado no observatório CTIO no Chile, utilizou 2 filtros de banda larga e realizou observações do céu com uma cadência de 4 dias. Esse levantamento, que foi realizado entre 2002 e 2007, detectou um total de $\simeq 200$ supernovas do tipo Ia com $z \lesssim 0,8$, em uma área aproximadamente 3 vezes maior do que o SNLS.

Com a descoberta de um número cada vez maior de SN Ia, ao longo dos anos surgiu também um esforço para a construção de amostras unificadas de supernovas. De fato, supernovas detectadas por diferentes telescópios passam por processos de análise diferentes e podem apresentar diferentes níveis de qualidade. Portanto, não basta combinar os resultados dos diferentes levantamentos para formar uma amostra unificada, mas é necessário refazer todas as análises utilizando as mesmas ferramentas e seguindo os mesmos passos, uniformizando, assim, o resultado.

Em 2008 surgiu a amostra unificada de supernovas do tipo Ia que ficou conhecida como *Union*,

²<https://www.wis-tns.org/>

³<https://sne.space>

⁴<http://cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS>

composta por 307 supernovas, com desvios para o vermelho entre $\sim 0,01$ e $\sim 1,55$ [27]. Essas supernovas foram selecionadas dentre aquelas detectadas pelos levantamentos SNLS, ESSENCE, SCP, dentre outros. Admitindo que o parâmetro w da equação de estado é constante, a análise cosmológica da amostra *Union*, combinada com os resultados provenientes de oscilações acústicas de bárions (BAO, do inglês *Baryon Acoustic Oscillations*) e radiação cósmica de fundo (CMB, do inglês *Cosmic Microwave Background*), resultam em $w = -0,969$, com incertezas devido a erros estatísticos e sistemáticos de valores muito próximos, entre 0,059 e 0,066. Esse resultado, além de ser consistente com um modelo de constante cosmológica para a energia escura, evidencia a transição que a cosmologia com supernovas do tipo Ia sofreu na década passada: o crescimento do número de supernovas observadas fez com que os erros estatísticos diminuíssem ao ponto de que, atualmente, os erros sistemáticos são as principais fontes de incerteza nesse tipo de análise.

Enquanto o SNLS e o ESSENCE se concentravam em descobrir supernovas distantes, uma equipe liderada pelo *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA)*⁵ utilizou o telescópio de 1,2 m de diâmetro do observatório F. L. Whipple, localizado no estado norte-americano do Arizona, para observar supernovas do tipo Ia próximas com um conjunto de 5 filtros de banda larga. Observações realizadas entre 2001 e 2008 produziram um conjunto de 185 supernovas do tipo Ia com $z \lesssim 0,08$, que ficou conhecido como CfA3 [28]. A adição desse conjunto de observações à amostra *Union* deu origem à amostra *Constitution*, em 2009 [29]. Após a exclusão de muitas supernovas do CfA3, que não seguiam os mesmos critérios de seleção da amostra *Union*, chegou-se à amostra final com 397 supernovas. A análise cosmológica da amostra *Constitution*, combinada com resultados provenientes de BAO, resulta em $w = -0,987$, com incertezas devido a erros sistemáticos e estatísticos de aproximadamente 0,11 e 0,066, respectivamente.

Em 2005, teve início o *SDSS Supernova Survey*,⁶ parte do levantamento *Sloan Digital Sky Survey (SDSS)*,⁷ realizado com um telescópio de 2,5 m de diâmetro no observatório Apache Point,

localizado no estado do Novo México, nos Estados Unidos. O SDSS visitou, com cadência de poucos dias, a chamada “faixa 82”, uma região do céu próxima ao equador celeste, com área equivalente a 1500 vezes a área ocupada pela Lua cheia no céu. Utilizando 5 filtros de banda larga, detectou, entre 2005 e 2008, aproximadamente 500 supernovas do tipo Ia com $0,05 < z < 0,4$, espectroscopicamente confirmadas, além de mais algumas centenas de supernovas desse tipo que não foram observadas através de espectroscopia [30].

A combinação das amostras de SN Ia detectadas pelo SDSS e pelo SNLS com supernovas próximas detectadas por outros experimentos deu origem em 2014 à amostra *Joint Light-Curve Analysis*, que ficou conhecida como “JLA” [20]. Com 740 supernovas do tipo Ia com $0,01 < z < 1,2$, a análise cosmológica da amostra JLA resultou em $w = -1,018 \pm 0,057$, combinando incertezas de origem estatística e sistemática.

A compilação mais recente de SN Ia é conhecida como *Pantheon* e contém 1048 supernovas com $0,01 < z < 2,3$ [31]. Publicada em 2018, essa amostra é formada por supernovas detectadas pelos levantamentos *Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System (Pan-STARRS)*, SDSS, SNLS, SCP, *Hubble Space Telescope (HST)* e SN Ia próximas de outros levantamentos. O levantamento Pan-STARRS é realizado em telescópios de 1,8 m, no Havaí, com 5 filtros de banda larga. Observações de uma área do céu equivalente a 350 vezes aquela ocupada pela Lua cheia, realizadas com o telescópio Pan-STARRS1 de 2010 a 2014, resultaram em 365 SN Ia espectroscopicamente confirmadas, descobertas utilizando 4 filtros e uma cadência média de 7 dias [31]. Combinando os dados de CMB com a amostra *Pantheon*, obtém-se $w = -1,026 \pm 0,041$.

As amostras JLA e *Pantheon* incluem também SN Ia próximas do levantamento *Carnegie Supernova Project (CSP)* [32] realizado no observatório *Las Campanas*, no Chile, entre 2004 e 2009. Utilizando um conjunto de 10 filtros no ótico e no infravermelho, o CSP obteve curvas de luz para ~ 100 supernovas próximas [33].

Não poderíamos deixar de enfatizar a relevância das supernovas descobertas pelos programas conduzidos no telescópio espacial Hubble⁸, que fazem parte de todas as amostras acima mencionadas e foram responsáveis pela detecção de

⁵<https://lweb.cfa.harvard.edu/supernova>

⁶<http://classic.sdss.org/supernova/aboutsupernova.html>

⁷<https://www.sdss.org/>

⁸<https://hubblesite.org/>

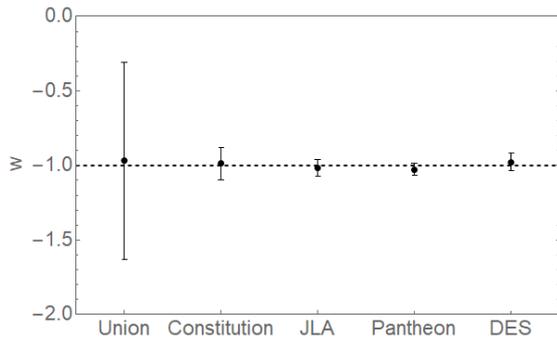


Figura 7: Evolução dos vínculos sobre o parâmetro w da energia escura.

grande parte das supernovas do tipo Ia mais distantes até hoje conhecidas [34].

Por fim, em 2019, o levantamento *Dark Energy Survey* (DES)⁹ publicou os dados de uma amostra de SN Ia que contém 207 supernovas com $z < 0,85$, detectadas entre 2013 e 2016 [35]. O DES foi realizado no telescópio *Blanco*, com 5 filtros de banda larga e, para a procura de supernovas, observou uma área de 27 graus quadrados, correspondente à aproximadamente 130 vezes a área ocupada no céu pela Lua cheia, uma vez por semana. Utilizando uma amostra que contém também 122 supernovas próximas, a colaboração DES obteve $w = -0,978 \pm 0,059$, ao combinar com o vínculos obtidos com dados de CMB.

Na Figura 7 estão representados os vínculos sobre w obtidos com cada uma das amostras mencionadas e é possível verificar a drástica redução das barras de erro desde 2008, com a amostra *Union*, até 2018, com a amostra *Pantheon*. O DES ainda não publicou sua amostra final de supernovas Ia, mas tem potencial para superar a precisão atual, de acordo com simulações.

5 Desafios para o futuro

Atualmente, três levantamentos realizados com telescópios de menor porte têm se destacado na detecção de supernovas. O *Zwicky Transient Facility* (ZTF) [36] é realizado com um telescópio de 1,2 m no observatório de Palomar, na Califórnia, Estados Unidos, e tem capacidade para observar uma área de quase 1/10 de todo o céu a cada hora. Utilizando dois filtros de banda larga, o ZTF é dedicado à detecção de transientes e está em funcionamento desde 2017. O levanta-

mento *Asteroid Terrestrial-impact Last Alert System* (ATLAS) [37], dedicado à detecção de asteroides, é realizado com dois telescópios de apenas 0,5 m no Havaí. Com capacidade para observar 25% do céu até 4 vezes por noite, o ATLAS está em funcionamento desde 2017 e utiliza 5 filtros de banda larga e 2 filtros de banda estreita. Por fim, o levantamento *All-Sky Automated Survey for Supernovae* (ASAS-SN) [38], em operação desde 2014, é dedicado à detecção de supernovas e observa o céu todo com 24 telescópios distribuídos por diferentes continentes. Todos os três levantamentos possuem cadência que podem variar de horas a poucos dias e podem detectar supernovas próximas (com $z \lesssim 0,24$). De acordo com o *Transient Name Server*, apenas esses levantamentos foram responsáveis pela detecção de mais de 5000 SN Ia nos últimos anos.

Com o rápido aumento do número de SN Ia, as incertezas relacionadas à análise cosmológica com supernovas desse tipo é cada vez mais dominada por erros de origem sistemática. Abaixo, dividimos as principais fontes de erros sistemáticos na análise de SN Ia em categorias.

- **Calibração fotométrica e critérios de seleção**
A imagem produzida por um telescópio contém apenas informação do número de fótons provenientes de cada fonte. Para converter essa informação em fluxo, é necessário realizar a calibração fotométrica da imagem, que utiliza informação sobre o fluxo de estrelas de referência já conhecidas que apareçam na imagem. Esse procedimento naturalmente introduz incertezas no fluxo calculado, que dependem também das características de cada instrumento e filtro utilizados. Além disso, cada instrumento naturalmente impõe diferentes restrições sobre a distância máxima ou brilho mínimo dos objetos que podem ser detectados e, portanto, os resultados de diferentes levantamentos possuem diferentes graus de completeza. Por fim, cada grupo adota seus próprios critérios para selecionar as supernovas cuja evolução será acompanhada ou que serão observadas por espectroscopia, o que introduz também diferenças entre as diferentes amostras. Para reduzir o impacto dessas incertezas, o ideal é que a análise cosmológica seja realizada a partir de uma amostra homogênea de supernovas, obtida com o mesmo instru-

⁹<https://www.darkenergysurvey.org/>

mento e o mesmo conjunto de filtros. Esse é o objetivo do levantamento *Foundation* [39], que pretende construir uma amostra de SN Ia detectadas apenas pelos telescópios Pan-STARRS.

- **Padronização das curvas de luz**
Como vimos na Seção 2, os métodos de padronização de SN Ia para uso em cosmologia, em geral, envolvem uma etapa de treinamento na qual usamos informação de SN Ia conhecidas, em uma ampla faixa de comprimento de onda e tempo. O intervalo, nessas duas variáveis, entre as observações, assim como a precisão das medidas, determina o quão bem podemos inferir o comportamento geral das SN Ia e modelar variações em torno dele. A qualidade e a quantidade dos dados usados no treinamento dos ajustadores de curva de luz são importantes fontes de erros sistemáticos na análise cosmológica e têm sido objeto de constantes revisões e aperfeiçoamentos.
- **Determinação do desvio para o vermelho e classificação**
Incertezas associadas ao cálculo do desvio para o vermelho obtido espectroscopicamente são muito pequenas. No entanto, o crescente número de supernovas detectadas torna praticamente impossível o acompanhamento espectroscópico de todas elas e, portanto, o desvio para o vermelho deve ser estimado através apenas da fotometria. Incertezas relacionadas ao cálculo do desvio para o vermelho fotométrico podem ser reduzidas com a melhoria dos algoritmos utilizados e também com o uso de dados em diferentes faixas de frequência. O levantamento *Javalambre Physics of the Accelerating Universe Astrophysical Survey* (J-PAS)¹⁰ [40], por exemplo, que é fruto da colaboração entre Brasil e Espanha, realizará observações de aproximadamente 1/4 do céu com um conjunto de 59 filtros de banda estreita, larga e intermediária. Espera-se que os resultados do J-PAS possam contribuir para o aprimoramento na determinação de desvios para o vermelho fotométricos. Um problema adicional associado à ausência de observações espectroscópicas é que sem espectro não po-

demos identificar com certeza o tipo da supernova. É possível classificar SN fotometricamente, usando técnicas semelhantes às aplicadas ao desvio para o vermelho. Infelizmente, é possível que algumas SN sejam classificadas erroneamente, o que introduziria uma contaminação na amostra de SN Ia por outros tipos.

- **Evolução**
A possibilidade de que as características das explosões de supernovas possam depender das propriedades do meio em que se encontram como a idade e abundância de diferentes elementos (medida pela chamada *metallicidade*) na galáxia hospedeira é alvo de intenso debate na comunidade científica. Dessa forma, supernovas distantes, que explodiram quando o Universo era muito mais jovem, poderiam ser intrinsecamente diferentes das supernovas mais próximas o que, se não for levado em consideração, é uma fonte de erro na análise cosmológica com SN Ia. Para desvendar essa e outras questões em aberto com relação às explosões de supernovas, precisamos fundamentalmente entender com mais detalhes a natureza de seus progenitores e os mecanismos de explosão. Uma revisão sobre essas questões é apresentada em [41]. De um ponto de vista observacional, informação sobre os estágios finais da evolução da estrela pode ser obtida através da detecção de polarização da luz emitida pelas supernovas logo após a explosão [42]. Além disso, o advento da espectroscopia com *Integral Field Units* (IFU) permite a observação das variações de metalicidade em diferentes regiões das galáxias, representando um grande avanço no estudo da correlação entre esse parâmetro e as propriedades das supernovas.
- **Extinção por poeira**
A luz emitida pelas supernovas é parcialmente absorvida pelas pequenas partículas de poeira cósmica que se encontram no seu trajeto entre a explosão e a Terra. Os ajustadores de curva de luz realizam correções para esse efeito considerando a chamada *extinção* do brilho das supernovas pela poeira na nossa galáxia, através de estimativas da quantidade de poeira em cada direção do céu.

¹⁰<http://www.j-pas.org/>

Esse procedimento, assim como as correções ainda mais incertas para a absorção na galáxia hospedeira, é, claramente, fonte de erro na análise cosmológica de SN Ia. A extinção, que depende do comprimento de onda da radiação, é consideravelmente menor na faixa do infravermelho e espera-se, portanto, que a detecção de supernovas nessa faixa por projetos futuros como o do telescópio espacial Nancy Grace Roman¹¹ (previamente conhecido como WFIRST, com previsão para ser lançado em 2027) possa contribuir de forma significativa para a redução das incertezas associadas à absorção.

Atualmente, existe enorme expectativa para o início das atividades do levantamento *Legacy Survey of Space and Time* (LSST),¹² previsto para 2023. A ser realizado no Observatório Vera C. Rubin, no Chile, com um telescópio de 8,4 m de diâmetro, espera-se que o LSST obtenha uma amostra de supernovas 300 vezes maior do que o número total de supernovas conhecidas atualmente, com $0 < z < 1$. Espera-se que, juntos, o LSST e o telescópio espacial Nancy Grace Roman, detectem mais de 300.000 SN Ia com desvios para o vermelho de até $z = 3$ [43]. A análise conjunta do enorme número de dados desses dois telescópios fornecerá informação no ótico e no infravermelho de milhares de supernovas distantes e, aliada à espectroscopia obtida com outros telescópios, contribuirá para a redução das incertezas de origem sistemática.

Sobre os autores

Beatriz B. Siffert (beatriz@caxias.ufrj.br) possui Bacharelado (2004) e Doutorado (2008) em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Possui Pós-doutorado na Universidade de Nápoles, Itália, no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, e no Instituto de Física da UFRJ. Tem experiência nas áreas de cosmologia e astrofísica, tendo trabalhado com detecção indireta de matéria escura, modelos cosmológicos com ricochete, e atualmente com a detecção de supernovas do tipo Ia e astrobiologia. Atualmente é professora adjunta de física no Campus Duque de Caxias da UFRJ.

¹¹<https://roman.gsfc.nasa.gov/>

¹²<https://www.lsst.org/>

Ribamar R. R. Reis (ribamar@if.ufrj.br) possui Bacharelado (2001), Mestrado (2003) e Doutorado (2007) em Física pela UFRJ. Possui Pós-doutorado pelo Fermi National Accelerator Laboratory, EUA (2008). Tem experiência nas áreas de relatividade e gravitação, atuando principalmente nos seguintes temas: supernovas do tipo Ia, oscilações acústicas de bárions, lentes gravitacionais, energia escura e modelos alternativos de gravitação. Atualmente é professor associado no Instituto de Física da UFRJ.

Referências

- [1] G. Lemaître, *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles* **47**, 49 (1927).
- [2] G. Lemaître, *A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **91**, 483 (1931).
- [3] E. Hubble, *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, *Proceedings of the National Academy of Science* **15**(3), 168 (1929).
- [4] H. S. Leavitt, *1777 variables in the Magellanic Clouds*, *Annals of Harvard College Observatory* **60**, 87 (1908).
- [5] H. S. Leavitt e E. C. Pickering, *Periods of 25 Variable Stars in the Small Magellanic Cloud.*, *Harvard College Observatory Circular* **173**, 1 (1912).
- [6] J. Guillochon et al., *An Open Catalog for Supernova Data*, *The Astrophysical Journal* **835**(1), 64 (2017). [ArXiv:1605.01054](https://arxiv.org/abs/1605.01054).
- [7] R. C. V. Coelho et al., *Standardization of type Ia supernovae*, *European Journal of Physics* **36**, 015007 (2015). [ArXiv:1411.3596](https://arxiv.org/abs/1411.3596).
- [8] C. T. Kowal, *Absolute magnitudes of supernovae*, *The Astronomical Journal* **73**, 1021 (1968).

- [9] J. A. Auping (ed.), *Proceedings of the International Conference on Two Cosmological Models* (Plaza y Valdes, 2012).
- [10] A. Clocchiatti, *Type Ia supernovae and the discovery of the cosmic acceleration* (2011). [ArXiv:1112.0706](#).
- [11] M. M. Phillips, *The absolute magnitudes of type Ia supernovae*, *Astrophysical Journal Letters* **413**, L105 (1993).
- [12] M. Hamuy et al., *The Absolute Luminosities of the Calan/Tololo Type Ia Supernovae*, *The Astronomical Journal* **112**, 2391 (1996). [ArXiv:astro-ph/9609059](#).
- [13] M. M. Phillips et al., *The reddening-free decline rate versus luminosity relationship for type Ia supernovae*, *The Astronomical Journal* **118**(4), 1766 (1999).
- [14] S. Perlmutter et al., *Measurements of the Cosmological Parameters Ω and Λ from the First Seven Supernovae at $z \geq 0.35$* , *The Astrophysical Journal* **483**(2), 565 (1997). [ArXiv:astro-ph/9608192](#).
- [15] A. G. Riess, W. H. Press e R. P. Kirshner, *A precise distance indicator: Type Ia supernova multicolor light-curve shapes*, *The Astrophysical Journal* **473**, 88 (1996). [ArXiv:astro-ph/9604143](#).
- [16] S. Jha, A. G. Riess e R. P. Kirshner, *Improved distances to type Ia supernovae with multicolor light-curve shapes: M_{lcs2k2}* , *The Astrophysical Journal* **659**(1), 122 (2007).
- [17] J. Guy et al., *SALT: a spectral adaptive light curve template for type Ia supernovae*, *Astronomy & Astrophysics* **443**(3), 781 (2005). [ArXiv:astro-ph/0506583](#).
- [18] J. Guy et al., *SALT2: using distant supernovae to improve the use of type Ia supernovae as distance indicators*, *Astronomy & Astrophysics* **466**(1), 11 (2007). [ArXiv:astro-ph/0701828](#).
- [19] J. Guy et al., *The supernova legacy survey 3-year sample: Type Ia supernovae photometric distances and cosmological constraints*, *Astronomy & Astrophysics* **523**, A7 (2010).
- [20] M. Betoule et al., *Improved cosmological constraints from a joint analysis of the SDSS-II and SNLS supernova samples*, *Astronomy & Astrophysics* **568**, A22 (2014).
- [21] W. D. Kenworthy et al., *SALT3: An Improved Type Ia Supernova Model for Measuring Cosmic Distances* (2021). [ArXiv:2104.07795](#).
- [22] P. A. Zyla (Particle Data Group) et al., *Review of Particle Physics*, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2020**, 083C01 (2020).
- [23] A. G. Riess et al., *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*, *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998).
- [24] S. Perlmutter et al., *Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae*, *The Astrophysical Journal* **517**(2), 565 (1999). [ArXiv:astro-ph/9812133](#).
- [25] P. Astier et al., *The Supernova Legacy Survey: measurement of Ω_M , Ω_Λ and w from the first year data set*, *Astronomy & Astrophysics* **447**(1), 31 (2006). [ArXiv:astro-ph/0510447](#).
- [26] G. Miknaitis et al., *The ESSENCE Supernova Survey: Survey Optimization, Observations, and Supernova Photometry*, *The Astrophysical Journal* **666**(2), 674 (2007). [ArXiv:astro-ph/0701043](#).
- [27] M. Kowalski et al., *Improved cosmological constraints from new, old, and combined supernova data sets*, *The Astrophysical Journal* **686**(2), 749 (2008).
- [28] M. Hicken et al., *CfA3: 185 type Ia supernova light curves from the CfA*, *The Astrophysical Journal* **700**(1), 331 (2009).
- [29] M. Hicken et al., *Improved dark energy constraints from 100 new CfA supernova type Ia light curves*, *The Astrophysical Journal* **700**(2), 1097 (2009).
- [30] M. Sako et al., *The Data Release of the Sloan Digital Sky Survey-II Supernova Survey*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **130**(988), 064002 (2018).

- [31] D. M. Scolnic et al., *The Complete Light-curve Sample of Spectroscopically Confirmed SNe Ia from Pan-STARRS1 and Cosmological Constraints from the Combined Pantheon Sample*, *The Astrophysical Journal* **859**(2), 101 (2018). [ArXiv:1710.00845](#).
- [32] M. Hamuy et al., *The Carnegie Supernova Project: The Low-Redshift Survey*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **118**(839), 2 (2006). [ArXiv:astro-ph/0512039](#).
- [33] M. D. Stritzinger et al., *The Carnegie Supernova Project: Second Photometry Data Release of Low-redshift Type Ia Supernovae*, *The Astronomical Journal* **142**(5), 156 (2011). [ArXiv:1108.3108](#).
- [34] A. G. Riess et al., *Type Ia Supernova Distances at Redshift >1.5 from the Hubble Space Telescope Multi-cycle Treasury Programs: The Early Expansion Rate*, *The Astrophysical Journal* **853**(2), 126 (2018). [ArXiv:1710.00844](#).
- [35] T. M. C. Abbott et al., *First Cosmology Results using Type Ia Supernovae from the Dark Energy Survey: Constraints on Cosmological Parameters*, *The Astrophysical Journal* **872**(2), L30 (2019).
- [36] E. C. Bellm, *The zwicky transient facility* (2014). [ArXiv:1410.8185](#).
- [37] J. L. Tonry et al., *ATLAS: A High-cadence All-sky Survey System*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **130**(988), 064505 (2018).
- [38] B. J. Shappee et al., *The Man behind the Curtain: X-Rays Drive the UV through NIR Variability in the 2013 Active Galactic Nucleus Outburst in NGC 2617*, *The Astrophysical Journal* **788**(1), 48 (2014). [ArXiv:1310.2241](#).
- [39] R. J. Foley et al., *The foundation supernova survey: motivation, design, implementation, and first data release*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **475**(1), 193 (2017).
- [40] N. Benitez et al., *J-pas: The javalambre-physics of the accelerated universe astrophysical survey* (2014). [ArXiv:1403.5237](#).
- [41] M. Livio e P. Mazzali, *On the progenitors of Type Ia supernovae*, *Physics Reports* **736**, 1 (2018).
- [42] L. Wang e J. C. Wheeler, *Spectropolarimetry of supernovae*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **46**(1), 433 (2008).
- [43] B. M. Rose et al., *Synergies between vera c. rubin observatory, nancy grace roman space telescope, and euclid mission: Constraining dark energy with type ia supernovae* (2021). [ArXiv:2104.01199](#).

J-PAS: o consórcio astronômico hispano-brasileiro

Cassio Pigozzo

Universidade Federal da Bahia

J-PAS, Javalambre - Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey

Resumo

Uma nova geração de telescópios está prestes a elevar nosso conhecimento astrofísico e cosmológico a outro patamar, e neste contexto se insere a colaboração J-PAS. Este artigo apresenta as características desta colaboração, com particular foco nos equipamentos que compõem o Observatório Astrofísico de Javalambre e nas suas peculiaridades. Os objetivos e alguns projetos-chave, envolvendo dezenas de instituições de diferentes nacionalidades, são brevemente apresentados. Apesar de inicialmente concebido como observatório dedicado à observação de oscilações acústicas bariônicas e estudos de propriedades da energia escura, a astronomia se beneficiará dos futuros catálogos de dados do J-PAS em diversas escalas.

Abstract

A new generation of telescopes is about to take our astrophysical and cosmological knowledge to another level, and that is where J-PAS collaboration is found. This article presents the characteristics of this collaboration, with particular focus on the equipment that makes up the Javalambre Astrophysical Observatory and its peculiarities. The objectives and some key projects, involving dozens of institutions of different nationalities, are briefly presented. Although initially conceived as an observatory dedicated to baryon acoustic oscillations observations and studies of dark energy properties, Astronomy will benefit from future J-PAS data catalogs at many scales.

Palavras-chave: J-PAS, energia escura, BAO, *redshift* fotométrico

Keywords: J-PAS, dark energy, BAO, photometric redshift

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37135](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37135)

1 Introdução

O *Javalambre - Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey*, J-PAS, é um projeto inovador de mapeamento fotométrico 3D de estruturas em larga escala, se estendendo por mais de 8.000 graus quadrados do céu do hemisfério Norte [1]. Trata-se de uma grande colaboração internacional coordenada pelo Brasil e pela Espanha, contando com mais de duzentos pesquisadores envolvidos. Há diversos projetos de pesquisa vinculados, varrendo áreas da cosmologia, astrofísica extragaláctica e astrofísica galáctica, além do estudo de objetos de nossa galáxia e, mais localmente, do sistema solar.

Esses projetos aguardam os dados que serão obtidos com o telescópio principal do J-PAS, de nome *Javalambre Survey Telescope (JST/T250)*, Figura 1, projetado especificamente para esta colaboração. O JST/T250 possui 2,55 metros de diâmetro e montagem Cassegrain, e está insta-



Figura 1: Telescópio principal do J-PAS, o JST/T250. Crédito da imagem: J-PAS.

lado a cerca de 2.000 metros de altitude, no Pico do Abutre, na Serra de Javalambre, Teruel - Espanha, compondo o Observatório Astrofísico de Javalambre (OAJ) – Figura 2. O J-PAS pertence ao conjunto de telescópios terrestres do chamado

Estágio IV de experimentos de energia escura.

Além da abertura de 2,55 metros, que permite a varredura de grande área do céu simultaneamente, outras características são muito importantes para garantir que o equipamento atinja o potencial desejado: a escolha do sistema de filtros e de câmeras que serão acoplados ao telescópio. E nestes quesitos o J-PAS tem dois grandes diferenciais.

O primeiro deles é um sistema de 56 filtros de banda estreita na região do espectro visível, além de 3 outros de banda larga, o que permitirá a obtenção de espectros fotométricos de baixa resolução. A Figura 3 ilustra as curvas de transmitância desses filtros.

O segundo é a JPCam, Figura 4, uma câmara mosaico de 14 CCDs, cada uma com 9,2 x 9,2 kpixels, somando mais de 1,2 milhões de pixels, capaz de fotografar simultaneamente uma área de 4,5 graus quadrados, o equivalente no plano do céu à área de aproximadamente 36 luas cheias. O projeto da JPCam foi de responsabilidade do Brasil, e ela já se encontra instalada no foco Cassegrain do telescópio JST/T250.

Neste artigo iremos apresentar em mais detalhes as características do projeto J-PAS, justificando porque há a expectativa de que ele seja um dos principais levantamentos de dados astrofísicos e cosmológicos desta década.

2 A luz das galáxias

O universo ao nosso redor é um imenso laboratório para os diversos campos da astronomia. Diferentemente dos laboratórios aqui na Terra, não temos controle sobre os eventos observados, nem podemos garantir sua reprodução. Tampouco podemos mudar parâmetros do “experimento” ao nosso sabor. Nos resta, com tecnologia adequada para a observação, extrair o máximo de informação dos dados a que temos acesso.

2.1 O fluxo

Os dados para estudos astronômicos são, em sua maioria, de origem eletromagnética, que podemos chamar simplesmente de *luz*. Uma importante informação da luz é bastante intuitiva: a medida do *fluxo*, ou intensidade, da radiação que incide em nossos detectores. Observando o céu noturno, percebemos que estrelas podem parecer

mais ou menos brilhantes, e essas diferenças podem ser devidas principalmente a dois fatores: a distância, r , que cada estrela está de nós, e de uma propriedade intrínseca da estrela, sua luminosidade, L .

A luminosidade é basicamente a medida da potência da fonte luminosa, ou seja, a razão entre a quantidade de energia emitida pelo intervalo de tempo de emissão. Se considerarmos que essa energia é transportada por frentes de onda esféricas e isotrópicas, temos que o fluxo médio, a uma certa distância r da fonte será

$$f = \frac{L}{4\pi r^2}. \quad (1)$$

Medindo o fluxo na observação, e conhecendo a distância que a fonte está através de algum método independente, como por exemplo via paralaxe estelar, podemos determinar a propriedade intrínseca da luminosidade daquele objeto. Por sua vez, caso tenhamos como identificar que outro objeto é da mesma classe do exemplo anterior, admitimos que esse tipo de objeto é uma *vela-padrão*, ou seja, de luminosidade conhecida. Assim, mesmo que ele tenha um brilho aparente bem fraco, e que seja impossível determinar sua distância por paralaxe estelar, podemos, medindo o fluxo e conhecendo sua luminosidade, determinar sua distância.

Este é um exemplo simples do que é conhecido como a *escada cósmica*. Há diversos métodos de determinação de distância, mas cada método tem seus limites de aplicabilidade devido à barreira da acurácia da medida, ou por não haver objetos com as características que determinado método exige a qualquer distância. Mas podemos sempre ancorar/calibrar um método para determinar distâncias maiores em outro adequado para determinar distâncias de objetos relativamente mais próximos.

Sabemos que a luz apresenta não apenas propriedades de fenômenos ondulatórios, como também características de partícula. Na Física de Partículas, a partícula da luz é chamada de fóton, o pacote mínimo de energia de luz, de maneira que podemos expressar o fluxo luminoso pela contagem do número de fótons que incidem no detector. Quanto maior a área do detector, mais fótons serão coletados.

O uso de placas fotográficas e posterior desenvolvimento de câmeras, em particular as modernas câmeras com dispositivo de carga acoplada



Figura 2: Observatório Astrofísico de Javalambre. Crédito da imagem: J-PAS.

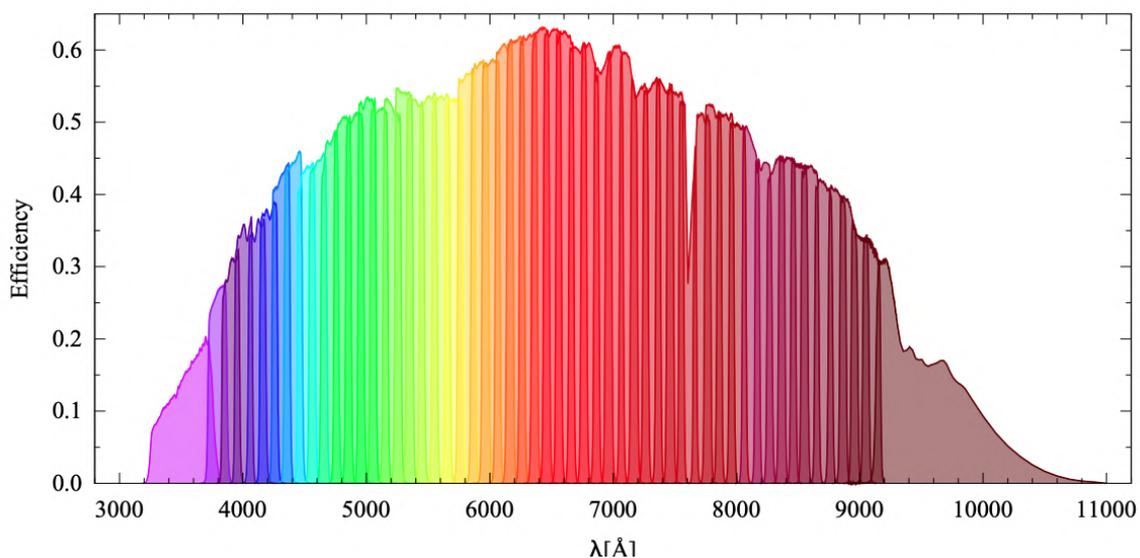


Figura 3: Sistema de filtros do telescópio JST/T250 [2]. São 56 filtros de banda estreita, com larguras de 145\AA , dispostos a cada 100\AA na região do espectro visível. Conta também com 3 filtros de banda larga. Mais detalhes sobre esses filtros e os do J-PLUS podem ser encontrados no [repositório de filtros do Observatório Virtual Espanhol \(SVO\)](#).

(em inglês, CCD), ampliou bastante a capacidade de observação de objetos distantes, não só com aumento da área de coleta, mas permitindo ampliar o tempo de integração da luz, bem como a chamada *eficiência quântica*, que é a medida do percentual de fótons incidente que é transformada em informação.

O olho humano é um instrumento fantástico, mas com grandes limitações para a astronomia, por ter baixo tempo de integração (exposição curta), de 0,015 s (cones) a 0,1 s (bastonetes), e baixa eficiência quântica, aproximadamente 3% (cone) a 10% (bastonetes). Isso quer dizer que 90% a 97% dos fotos incidentes nos nossos olhos, mesmo que na região do visível, não contribuem para a formação de imagem no cérebro. A JP-Cam, por sua vez, pode atingir eficiência quântica

de até 93%, e, com o armazenamento de dados digital, podemos somar o tempo de observação que for necessário para obter mais informações de um objeto muito distante, indetectável a olho nu.

2.2 O espectro

Outra propriedade extremamente importante da luz é seu *espectro*. Partindo dos famosos experimentos de Isaac Newton, fazendo a luz do Sol incidir sobre um prisma e estudando sua decomposição nas cores do arco-íris, pode-se associar velocidades de propagação (o que implica em índices de refração) distintas para as diferentes cores (frequências) da luz percorrendo o material do prisma. Aqui podemos fazer um salto para o século XX, apontando que o valor daquele pacote mínimo de energia do fóton é proporcional à

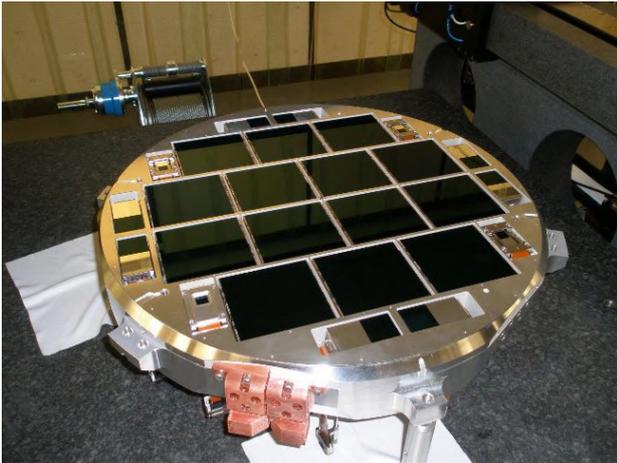


Figura 4: Foto da JPCam antes de ser acoplada ao telescópio. Conjunto de 14 câmeras CDD, compondo a maior câmera para fins astronômicos, projetada e fabricada especificamente para o J-PAS. Crédito da imagem: J-PAS.

frequência associada, ν , ou seja,

$$E = h\nu, \quad (2)$$

onde $h = 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$ é a constante de Planck [3]. Assim, a contagem de fótons que chegam no detector, de área de coleta A_D , pode ser classificada em termos da frequência de cada fóton, e assim podemos reescrever o fluxo medido como

$$f = \frac{\Delta E / \Delta t}{A_D} = \frac{\sum_i h\nu_i / \Delta t}{A_D}. \quad (3)$$

Em 1802, William Wollaston construiu um espectrômetro mais avançado e acoplado a uma lente para focalizar a luz do Sol, percebendo que, diferente do que se considerava até então, a luz não se espalhava uniformemente em todas as cores. Detectou-se pela primeira vez bandas escuras (linhas de absorção) no espectro solar, que foram erroneamente relacionadas com fronteiras naturais entre as cores. Uma análise mais cuidadosa feita pelo físico alemão Joseph Fraunhofer encontrou cerca de 600 linhas escuras (cores faltantes), o que descartava a hipótese da fronteira.

Podemos citar também os estudos do espectro de emissão de gases de diferentes elementos químicos ou moléculas, em laboratório. Os espectros obtidos eram notadamente descontínuos, visualizados como linhas ou estreitas bandas espectrais, e as posições dessas linhas, ou seja, as frequências associadas, dependiam da natureza química daquele gás. O físico dinamarquês Niels Böhr (1885-1962) propôs um modelo atômico

que complementava o modelo de Rutherford, vinculando a diferença nos espectros dos elementos químicos com os diferentes níveis de energia que os elétrons podem ocupar na estrutura de átomos de diferente natureza. Assim, dava-se início à consolidação dos espectros como “impressões digitais” dos elementos químicos, qualidade de extrema importância para a astronomia.

Admitindo-se que os fenômenos físicos no Sol, em outras estrelas e em outras galáxias respeitam as mesmas leis da Mecânica Quântica e da Física de Partículas que conhecemos aqui na Terra, podem-se extrair informações sobre a composição química do ambiente de origem daquela luz observada, apenas fazendo-se o estudo de seu espectro. A partir de um espectro de boa qualidade, é possível encontrar as linhas de emissão e absorção típicas dos elementos químicos e moléculas, e assim estimar a composição química da fonte emissora.

Foi observado que os espectros de algumas estrelas não coincidiam exatamente com os espectros dos elementos químicos conhecidos. Mas com um desvio sistemático das linhas para comprimentos de onda maiores ou menores, podia-se obter uma equivalência com espectros catalogados em laboratório. Assim, ainda sob a hipótese de que as leis físicas são universais, pode-se justificar o deslocamento do espectro através do efeito Doppler. Tomando o comprimento de onda de determinada linha espectral, medida em laboratório, ou seja, no referencial de repouso da fonte, λ_r , e o comprimento de onda associado à linha espectral da luz proveniente de uma estrela distante, λ , o desvio para o vermelho, ou *redshift*, é definido como

$$z \equiv \frac{\lambda - \lambda_r}{\lambda_r}, \quad (4)$$

ou seja, o desvio percentual do comprimento de onda. Se o espectro de uma fonte apresenta um valor positivo de z , conferimos uma velocidade de afastamento, e para $z < 0$, *blueshift*, aproximação. Então, a partir do espectro, obtemos não apenas informação sobre a composição química da fonte, mas também dados sobre seu estado de movimento em relação a nós. Esses dados permitem acessar uma grande riqueza de informações sobre os objetos, como velocidade, massa, diâmetro e temperatura. Pode-se afirmar que a espectroscopia aplicada a observações astronômicas fundou a astrofísica.

Ainda antes da publicação por Einstein da primeira aplicação da sua teoria da relatividade geral para descrever o universo, em 1917 [4], o astrônomo Vesto Melvin Slipher havia começado o árduo trabalho de medir espectros de objetos difusos, à época conhecidos como nebulosas espirais, posteriormente identificadas como galáxias. Em 1912, Slipher descobriu que as linhas espectrais da *nebulosa* de Andrômeda apresentavam grande deslocamento para o azul ($z \approx -0,001$), indicando uma velocidade de aproximação do sistema solar da ordem de 300 km/s. Nos anos seguintes ele continuou estas observações, obtendo o desvio do espectro de 41 galáxias, e, diferentemente de Andrômeda, a maioria apresentava deslocamento para maiores comprimentos de onda, ou seja, a maioria estaria se afastando de nós. O maior desvio para o vermelho obtido dentre estas galáxias foi de $z \approx 0,006$.

2.3 O universo dinâmico

Ao mostrar que as equações de campo da relatividade geral poderiam descrever o universo em larga escala, Albert Einstein postulou um universo estático, mesmo que para isso ele tivesse que incluir artificialmente uma constante cosmológica em suas equações para obter soluções estáticas. Apenas em 1922 o matemático e cosmólogo russo Aleksander Aleksandrovich Friedmann mostra, pela primeira vez, a possibilidade teórica de um universo em expansão [5]. Nesse trabalho e no seguinte, publicado em 1924 [6], ele obteve as soluções das equações de Einstein para um universo homogêneo e isotrópico, com as três curvaturas espaciais possíveis, que vão servir de base para construção de toda a cosmologia moderna.

Os trabalhos de Friedmann eram extremamente matemáticos, não fazendo conexão de seus resultados com as medidas de Slipher, apesar dessas medidas, indicando que os objetos mais distantes estavam se afastando de nós, serem compatíveis com os modelos de universo descritos. Não podemos deixar de citar também os importantes trabalhos do físico, astrônomo e cosmólogo belga Georges-Henri Édouard Lemaître, e dos astrônomos norte-americanos Edwin Powell Hubble e seu colaborador (e espectroscopista) Milton Lasell Humason, medindo os desvios para o vermelho das galáxias e derivando a famosa Lei de Hubble-Lemaître.

A métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-

Walker, usando coordenadas esféricas, pode ser escrita como

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\Omega^2 \right), \quad (5)$$

onde $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2$ e $k = +1, 0$, ou -1 , referentes às três possíveis geometrias do universo nos modelos de Friedmann. Desprezados os movimentos peculiares das galáxias, movimentos estes devidos a interações gravitacionais locais, estas galáxias ocupariam posições “fixas”, descritas por coordenadas comóveis (r, θ, ϕ) , e a dinâmica do universo fica descrita pelo fator de escala, $a(t)$. O aumento do fator de escala com o tempo implica na dilatação do espaço, e uma onda se propagando no espaço em expansão tem seu comprimento de onda “esticado”. Essa conexão entre o desvio para o vermelho da luz observada e o valor do fator de escala do universo quando essa luz foi emitida é dada por

$$\frac{a(t)}{a_0} = \frac{1}{1 + z}, \quad (6)$$

sendo a_0 o valor atual do fator de escala [7]. Esta equação é extremamente importante por fazer a conexão entre um observável, medido a partir do espectro da radiação detectada, com uma função que se propõe a descrever teoricamente o universo em que vivemos. E podemos interpretar que, quanto maior for o *redshift* da luz observada, maior foi o tempo que essa onda viajou até atingir nossos detectores; ou seja, mais distante estava a fonte quando emitiu esse sinal, e mais do passado é essa informação.

As velocidades peculiares citadas anteriormente são da ordem de 10^2 km/s, como vimos no caso da galáxia de Andrômeda. Para que as velocidades peculiares tivessem no máximo a ordem de grandeza dos erros das medidas, foram necessários *redshifts* da ordem de 10^{-2} ou superiores, associados a velocidades de recessão $> 10^3$ km/s, o que implicava em obter informações de objetos distantes, na escala cosmológica, onde o fluxo de Hubble passa a ser relevante.

Todo este contexto foi descrito para enfatizar a importância das medidas de espectro e seu desvio na construção de nosso conhecimento atual da astrofísica e da cosmologia, e em que direção os novos experimentos precisam apontar para que tenhamos mais dados, e dados mais precisos, para que possamos atacar questões ainda em aberto.

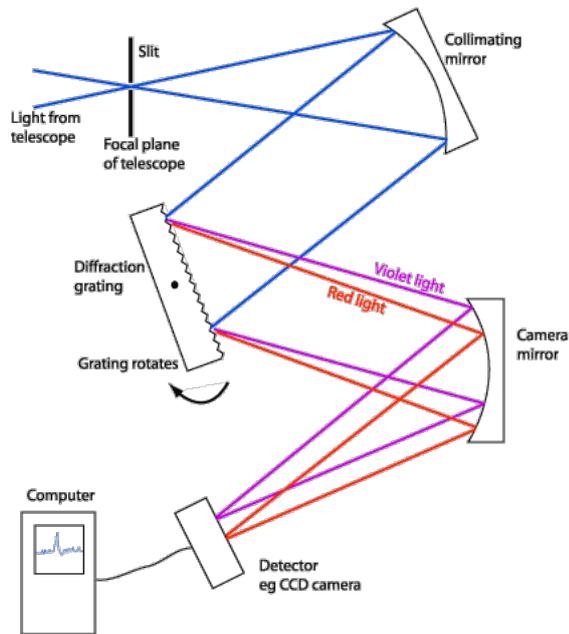


Figura 5: Representação esquemática do funcionamento de um espectrógrafo acoplado a um telescópio. A luz proveniente de uma fonte astronômica atravessa uma fenda, seus feixes são colimados, e a separação das frequências se dá por uma rede de difração. Os fótons de diferentes frequências são coletados em posições diferentes da câmera CCD, e essas informações são registradas no computador, onde o espectro é configurado. Imagem adaptada de [8].

Mas os espectros de alta resolução não são baratos.

Na Figura 5 apresentamos um exemplo do esquema de funcionamento de um espectrógrafo de fenda acoplado a um telescópio. No lugar de um prisma, temos uma rede de difração como agente dispersor da luz. Pela fenda do topo da figura, atravessa a luz proveniente de um objeto pontual, como uma estrela, ou mapeia-se partes de uma galáxia. Além do custo para construção e manutenção do equipamento, há o tempo de observação necessário para aquisição de um espectro de qualidade. Nas últimas décadas um considerável avanço foi alcançado com as tecnologias de espectroscopia multifibra, onde numa mesma área de observação diversas fontes têm fibras óticas associadas, para obtenção de informação e construção de espectros de objetos distintos simultaneamente. Esta tecnologia é aplicada, por exemplo, nos Sloan Digital Sky Surveys (SDSS), e alguns exemplos de espectros obtidos nessa colaboração estão apresentados em cinza da Figura 6.

2.4 Redshifts fotométricos

Aqui entra o grande diferencial da metodologia aplicada no J-PAS: uma alternativa para obtenção do espectro e do desvio para o vermelho de uma quantidade muito grande de fontes, simultaneamente, ao coletar dados de uma área grande do céu. Essa é a aposta do inovador sistema de filtros de banda estreita, ilustrados na Figura 3. Ao invés de investir em um espectrógrafo caro, que exige um alto custo em tempo para construção de um catálogo grande, poderemos construir espectros a partir da fotometria, ou seja, da contagem de fótons que atravessam filtros estreitos, em torno de frequências específicas.

Os desvios do espectro obtidos a partir de fotometria são chamados de *redshifts* fotométricos (*photo-z*), em contraste com os tradicionais *redshifts* espectroscópicos. Notadamente, a resolução do espectro fotométrico é inferior ao espectroscópico, mas a derivação do *redshift* pode ser calibrada a partir de valores espectroscópicos e, com técnicas modernas de aprendizado de máquina, se ter sucesso na medida do *photo-z*. Estima-se que a combinação de equipamentos de aquisição de dados e de técnicas de processamento dos mesmos permita um erro na medida do *redshift* fotométrico da ordem de

$$\sigma_z(z) = 0.003(1+z). \quad (7)$$

A utilização de 59 filtros exigiu a definição de uma logística de troca desses filtros ao longo da observação de determinada área do céu, implicando no desenvolvimento de uma mecânica específica de funcionamento para os equipamentos do J-PAS. Antes da instalação da JPCam, foi feito um levantamento preliminar com o telescópio, para testar o potencial do conjunto JST/T250 + filtros, mas com uma câmera provisória, a JPAS-Pathfinder. Observando apenas 1 grau quadrado do céu, foram coletadas informações de 64.000 fontes, que compõem o catálogo *miniJPAS* [2].

A acurácia da medida do *redshift* fotométrico foi testada comparando-se os valores obtidos com mais de 5 mil galáxias com seus *redshifts* espectroscópicos, que já haviam sido medidos com o SDSS. Alguns exemplos estão apresentados nos painéis (c) e (d) da Figura 6. Para um conjunto de 17.500 galáxias com *photo-z* derivado, estima-se que cerca de 4 mil apresentem erro no *redshift* inferior a 0,003 [9].

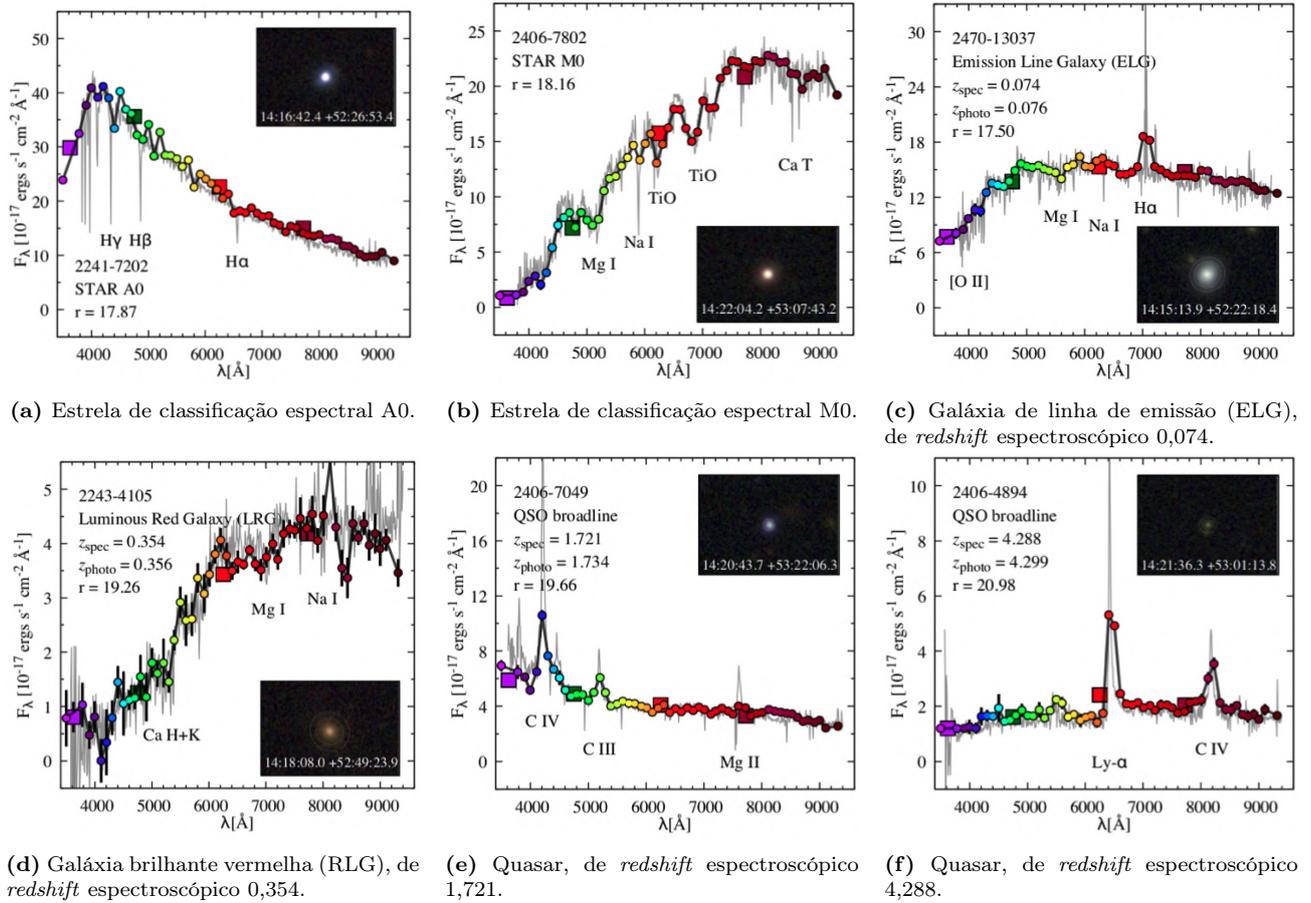


Figura 6: Exemplos de espectros fotométricos obtidos com miniJPAS (pontos coloridos) de objetos cujos espectros já são conhecidos (em cinza) no levantamento do SDSS [2]. As classificações dos objetos estão apresentadas nas legendas de cada gráfico.

Esses resultados preliminares são bastante animadores, e espera-se que o volume dos catálogos cresça em pelo menos mil vezes, quando o J-PAS atingir todo seu potencial, mapeando os objetos ao longo de 8.500 graus quadrados. Ao final, estima-se a medida de *redshifts*, com a acurácia dada pela equação (7), de 10^8 galáxias do tipo LRG e ELG, além de milhões de quasares, varrendo um volume efetivo de $\sim 14 \text{ Gpc}^3$, até *redshifts* de $\sim 1,3$.

3 O Observatório Astrofísico de Javalambre

O parque de observação que compõe o OAJ está situado na Serra de Javalambre, na cidade de Teruel - Espanha. O terreno foi cedido pelo governo espanhol ao *Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón* (CEFCA), responsável pela construção da infraestrutura de prédios e telescópios, projetados especificamente para a

colaboração J-PAS. A concepção do projeto do J-PAS data do ano de 2010. O ambiente é propício devido a sua baixa umidade e sua altitude de 1.957 m, com excelentes índices de observação astronômica, incluindo mais de 53% de noites com céu limpo ao longo do ano, e impressionante escuridão [10].

O OAJ conta com dois telescópios: um de 80 cm de diâmetro, chamado *Javalambre Auxiliary Survey Telescope* (JAST/T80), e o principal, com 2,55 metros de diâmetro, o JST/T250. O JAST/T80 opera com um sistema de filtros mais simples, totalizando 12, dentre os quais alguns são em comum com o JST/T250. Sua câmera, também mais simples, é a T80Cam. Esse conjunto de equipamentos faz estudos do universo local, principalmente objetos dentro de nossa galáxia, compondo o *Javalambre Photometric Local Universe Survey*, ou J-PLUS [11].

O telescópio principal, o JST/T250, é capaz de fotografar, simultaneamente, uma área de 4,5 graus quadrados. Nele está instalado o inovador

sistema de 56 filtros de banda estreita, e em junho de 2020 foi instalada a JPCam. O design desta câmera marca um grande avanço da física e da engenharia brasileira, tendo como protagonista o Observatório Nacional do Rio de Janeiro, com participação importante da Universidade de São Paulo. Foram investidos cerca de 9 milhões de euros, oriundos tanto do Ministério da Ciência e Tecnologia, através da FINEP, como das Fundações de Amparo à Ciência dos estados do Rio de Janeiro e de São Paulo. A JPCam possui mais de 1,2 milhões de pixels distribuídos em um mosaico de 14 detectores (ver Figura 4), que trabalham em condições de alto vácuo a 110^o Celsius abaixo de zero. Para visualizar uma de suas imagens em escala real, seria necessário reunir mais de 500 monitores full HD.

Na noite de 29 de junho, logo após o acoplamento da JPCam ao JST/T250, foi feita a primeira luz técnica do sistema telescópio + câmera, ou seja, pela primeira vez ele foi apontado para um objeto do céu, com objetivo de testar se o sistema estava operando de acordo com o projetado. Apesar de não estar calibrado para produzir sua melhor qualidade de imagem, foi possível obter uma fotografia impressionante da galáxia de Andrômeda (M31), Figura 7. Desde então, o projeto se encontra em sua fase final de testes e aprimoramentos, para então dar início à coleta de dados e construção de seus catálogos.

O imenso volume de dados a ser obtido por noite de observação pelo J-PAS exige um avançado sistema de transferência, armazenamento e indexação de dados. A infraestrutura do projeto é completada com o Centro de Dados do CEFCA, a UPAD (*Unit for Processing and Data Archiving*), contando com capacidade de 6,1 PB de armazenamento, 3,3 TB de RAM e 406 núcleos, características necessárias para armazenar, processar e analisar as imagens.¹

4 Projetos de pesquisa

O J-PAS foi concebido como um projeto dedicado à cosmologia, com particular interesse na

¹Links para mais informações:

- J-PAS: j-pas.org
- J-PLUS: www.j-plus.es
- OAJ: oajweb.cefca.es

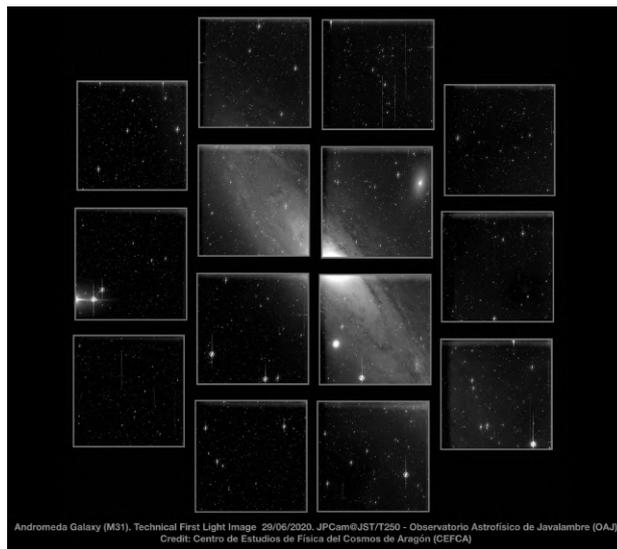


Figura 7: Imagem da galáxia M31 obtida com a primeira luz técnica do conjunto JST/T250+JPCam. Crédito da imagem: J-PAS.

medida de oscilações acústicas bariônicas (BAO) a partir do mapeamento 3D das estruturas em larga escala [12]. A existência de uma escala com incremento de densidade tem origem física nas oscilações do fluido fótons-bárions que preenchia todo o universo quando ele tinha idade inferior a 380 mil anos. Nesse período o universo era muito quente, denso e opaco, uma vez que os fótons não conseguiam viajar livremente.

A medida do BAO é tridimensional, podendo ser decomposta em BAO angular, bi-dimensional, e BAO radial, ao longo da linha de visada. Este último será o que o J-PAS medirá. Devido à qualidade dos dados, efeitos de lentes gravitacionais fracas também poderão ser medidos, constituindo mais um observável interessante para a cosmologia. O volume e a qualidade dos dados a serem adquiridos colocam essa colaboração em uma posição competitiva entre outras colaborações de mesma geração, como DESI [13, 14] e Euclid [15], que também estão prestes a iniciar seus levantamentos.

Será possível mapear e estudar aglomerados de galáxias, que são as maiores estruturas colapsadas do universo, com centenas ou milhares de galáxias. Um nicho único do J-PAS, o qual foi previsto e demonstrado pelo miniJPAS, foi a detecção de aglomerados de galáxias de baixas massas, i.e., grupos de galáxias, de 10 a 100 vezes menos massivos que aglomerados de galáxias a *redshifts* altos. A caracterização desses sistemas permitirá testes cosmológicos com figura de mérito tão alto

como através dos BAOs.

Outros projetos de pesquisa dentro do J-PAS investigam os impactos, por exemplo, de futuras observações de supernovas e quasares. Os diferentes observáveis permitirão aprofundar nosso conhecimento sobre as propriedades da energia escura, responsável pela atual aceleração da expansão do universo, no contexto do modelo padrão da cosmologia. Há também propostas de modelos alternativos, seja no cenário de gravidade modificada ou de interação no setor escuro, ou mesmo na busca por novas espécies de neutrinos, além de sinais de anisotropias e inhomogeneidades no universo em larga escala.

Observar grandes áreas do céu, podendo analisar o desvio do espectro de diversas fontes em uma só imagem, faz com que os dados da colaboração J-PAS não se restrinjam apenas à cosmologia. Vai ser possível, por exemplo, realizar o estudo de evolução de galáxias, medindo parâmetros como temperaturas e massas estelares, distribuição de idades das estrelas e suas metalicidades, extinção por poeira e emissão por gás interestelar. Em escalas menores de distância, ainda poderão ser obtidos parâmetros de objetos ainda menores, como asteroides.

O projeto é binacional, coordenado pelo Observatório Nacional do Rio de Janeiro (ON) e pela Universidade de São Paulo (USP), do lado brasileiro, e pelos Centro de Estudios de Física del Cosmos de Aragón (CEFCA) e Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), do lado espanhol. Conta com o credenciamento de diversas instituições do Brasil e da Espanha, além de outros países como China, Estados Unidos, Índia, Reino Unido, França, Itália, México, Suíça, Finlândia, Estônia, Etiópia, Alemanha, Venezuela, Polônia, Taiwan e Chile, totalizando mais de 250 pesquisadores envolvidos.

Agradecimentos

Agradeço a Saulo Carneiro e a Renato Dupke pela revisão cuidadosa do texto, com importantes sugestões e contribuições.

Sobre o autor

Cassio Pigozzo (cpigozzo@ufba.br) é professor do Departamento de Física Geral da Universidade

Federal da Bahia (UFBA). Pesquisa na área da cosmologia, com particular interesse em métodos estatísticos aplicados aos testes de modelos cosmológicos. Publicou trabalhos restringindo modelos de interação no setor escuro com dados de supernovas do tipo Ia, oscilações acústicas bariônicas e radiação cósmica de fundo, dentre outros. É membro da colaboração J-PAS, integrando o grupo de trabalho científico de Teoria e Física Fundamental.

Referências

- [1] N. Benitez et al., *J-PAS: The Javalambre-Physics of the Accelerated Universe Astrophysical Survey* (2014). [ArXiv: 1403.5237](#).
- [2] S. Bonoli et al., *The miniJPAS survey: A preview of the Universe in 56 colors*, *Astronomy & Astrophysics* **653**, A31 (2021).
- [3] D. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics* (Prentice Hall, New Jersey, 1995).
- [4] A. Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, *Königlich Preußische Akademie der Wissenschaften* **142** (1917).
- [5] A. Friedman, *Über die Krümmung des Raumes*, *Zeitschrift für Physik* **10**(1), 377 (1922).
- [6] A. Friedmann, *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*, *Zeitschrift für Physik* **21**(1), 326 (1924).
- [7] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology: principles and applications of the general theory of relativity* (John Wiley & Sons, New York, 1972).
- [8] J. B. Kaler, *Stars and their Spectra: An Introduction to the Spectral Sequence* (Cambridge Univ. Press, New York, 1997).
- [9] A. Hernán-Caballero et al., *The miniJPAS survey: Photometric redshift catalogue*, *Astronomy & Astrophysics* **654**, A101 (2021).

- [10] M. Moles et al., *Site testing of the Sierra de Javalambre: First Results*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **122**(889), 363–372 (2010).
- [11] A. J. Cenarro et al., *J-PLUS: The Javalambre Photometric Local Universe Survey*, *Astronomy & Astrophysics* **622**, A176 (2019).
- [12] N. Benítez et al., *Measuring baryon acoustic oscillations along the line of sight with photometric redshifts: The Pau Survey*, *The Astrophysical Journal* **691**(1), 241–260 (2009).
- [13] A. Aghamousa et al., *The DESI Experiment Part I: Science, Targeting, and Survey Design* (2016). [ArXiv:1611.00036](#).
- [14] A. Aghamousa et al., *The DESI Experiment Part II: Instrument Design* (2016). [ArXiv:1611.00037](#).
- [15] A. Refregier et al., *Euclid Imaging Consortium Science Book* (2010). [ArXiv:1001.0061](#).

A cosmologia de 21 cm e o radiotelescópio BINGO

Carlos Alexandre Wuensche

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Resumo

Apresentamos neste artigo um breve panorama da cosmologia de 21 cm, baseada no estudo da transição hiperfina do spin do elétron no átomo de hidrogênio neutro (HI). A distribuição de HI é um dos traçadores da aglutinação de matéria e da formação de estruturas e é, possivelmente, a única forma de observar o universo antes da reionização, ocorrida em $20 \gtrsim z \gtrsim 6$. Apresentamos a técnica de radioastronomia utilizada para medir a distribuição de HI, conhecida como mapeamento de intensidade, e os requisitos instrumentais necessários para realizá-lo e produzir um levantamento de HI em rádio, ao longo de um intervalo de *redshifts* $2,5 \gtrsim z \gtrsim 0,1$. Nesse contexto, apresentamos o radiotelescópio BINGO, que está sendo construído no Brasil e foi projetado para medir oscilações acústicas de bárions no universo próximo ($0,127 \leq z \leq 0,449$) usando o mapeamento de intensidade da transição de 21 cm.

Abstract

In this article we present a brief overview of the 21 cm cosmology, based on the study of the hyperfine spin transition of the electron in the neutral hydrogen atom (HI). The hydrogen distribution is one of the tracers of the matter clustering and formation of structures and it is possibly the only way to observe the Universe before reionization, which occurred in $20 \gtrsim z \gtrsim 6$. We present the radio astronomy technique used to measure the distribution of HI, known as intensity mapping, and the instrumental requirements needed to perform it and produce a HI survey in radio, over an interval of *redshifts* $2.5 \gtrsim z \gtrsim 0.1$. In this context, we present the BINGO radio telescope, which is being built in Brazil and was designed to measure acoustic oscillations of baryons in the nearby Universe ($0.127 \leq z \leq 0.449$) using intensity mapping of the 21 cm transition.

Palavras-chave: cosmologia de 21 cm, radioastronomia, oscilações acústicas de bárions

Keywords: 21 cm cosmology, radioastronomy, baryon acoustic oscillations

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.36917](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.36917)

1 Introdução

A astronomia e a cosmologia no séc. XXI vêm se beneficiando de uma série de novos resultados em diversos comprimentos de onda obtidos a partir da análise de dados de grandes levantamentos observacionais em rádio e micro-ondas (NVSS, WMAP, Planck), no óptico/infravermelho (SDSS, DESI, Pan-Starrs) e em energias mais altas (raios-X e gama) (AGILE, Fermi, Swift, Chandra, Integral, XMM-Newton). A década atual também verá o início de operação dos observatórios mais poderosos já concebidos pelo homem, como os satélites James Webb Space Telescope e Euclid, o Square Kilometre Array Observatory (SKAO), o Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI) e o Large Synoptic Survey Telescope (LSST), agora renomeado Vera C. Rubin Observatory.

Entretanto, algumas questões fundamentais

que ligam a astrofísica à cosmologia e à própria física permanecem em aberto, algumas há várias décadas. Entre elas, podemos citar a origem e a natureza do “setor escuro” do universo, constituído de matéria escura (ME) e energia escura (EE), e a validação da hipótese inflacionária para o modelo cosmológico padrão, que considera um universo em expansão acelerada e composto, além de ME e EE, de matéria bariônica, radiação e neutrinos (Λ CDM). As três questões têm implicações profundas não só na visão de universo adotada pela cosmologia atual, mas também na essência da física de partículas e nas teorias de unificação das interações fundamentais.

Particularmente, a compreensão das propriedades da EE está possivelmente ligada à aceleração da expansão do universo, que pode ser explicada por diferentes abordagens da equação de estado do fluido cósmico. Uma abordagem al-

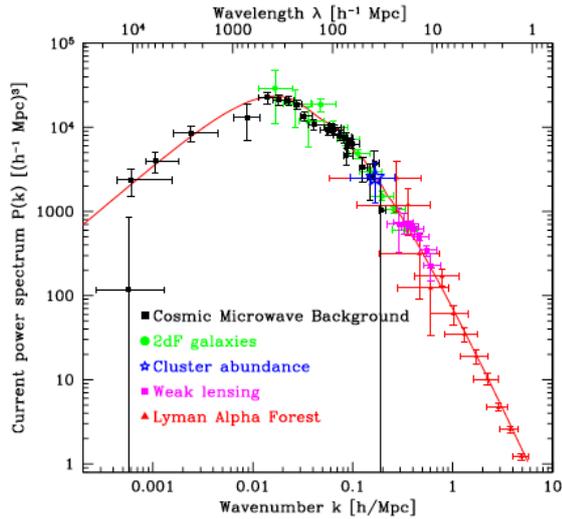


Figura 1: Espectro de potência da matéria. a curva vermelha é a previsão teórica, superposta às medidas dos observáveis listados na legenda. Créditos: Adaptado da Ref. [4]

ternativa é a modificação da teoria da relatividade geral em escalas cosmológicas. Alguns observáveis foram selecionados para o estudo da origem e propriedades da aceleração cósmica, buscando caracterizá-la no contexto da EE. Ao longo de mais de duas décadas, as supernova tipo Ia (SN Ia), as oscilações acústicas de bárions (em inglês, Baryon Acoustic Oscillations - BAO), o lenteamento gravitacional fraco (em inglês, Weak Lensing - WL) e a determinação da abundância de aglomerados de galáxias (em inglês, Cluster Counts - CC) vêm sendo considerados como as principais sondas para explorar o universo no intervalo de *redshift*¹ $6 \lesssim z \lesssim 0$ [1–3].

Cada um desses observáveis tem como alvo uma determinada classe de objetos astronômicos. Combinados, eles cobrem um grande intervalo de *redshift* e, conseqüentemente, permitem uma excelente confirmação da forma do espectro de potência da matéria ao longo de um grande volume no universo, desde o regime linear, na época da radiação cósmica de fundo em microondas (em inglês, cosmic microwave background - CMB) até épocas mais recentes, com as perturbações de matéria evoluindo para um regime extremamente não-linear. A Figura 1 apresenta o espectro de potência da matéria superposto a medidas de alguns observáveis cosmológicos, ao longo da história do universo.

Uma maneira de “rastrear” essa evolução co-

¹Desvio para o vermelho em inglês.

brindo um grande volume cósmico é mapear a distribuição do hidrogênio neutro (HI) através de medidas da linha de 21 cm ao longo da história do universo (ver, e.g., [5–7]). A emissão em 21 cm correspondente à transição hiperfina do átomo de hidrogênio, medida com bastante precisão ($\lambda = 21,1$ cm, correspondendo a uma frequência $\nu = 1420,4$ MHz). A transição em 21 cm é sensível à temperatura e ao estado de ionização do gás intergaláctico, bem como aos valores dos parâmetros cosmológicos. Como transição ocorre em uma frequência muito bem definida, observações do mesmo fenômeno feitas em diferentes frequências permitem estimar diretamente o *redshift* da fonte emissora.

Este artigo pretende apresentar uma visão geral do estudo cosmológico da distribuição de HI ao longo da história do universo, a chamada “cosmologia de 21 cm”. Discutiremos os fundamentos nos quais a cosmologia de 21 cm está baseada na Seção 2 e sua relação com os observáveis cosmológicos usados para colocar vínculos no modelo cosmológico padrão na Seção 3. A Seção 4 discute a técnica de mapeamento de intensidade. A instrumentação necessária para o estudo da distribuição de HI será tratada na Seção 5, e o radiotelescópio BINGO será apresentado na Seção 6. Faremos as considerações finais na Seção 7.

2 Fundamentos da cosmologia de 21 cm

O universo evoluiu de um estado denso e quente, com pequenas perturbações na distribuição do fluido matéria-radiação ($\delta\rho/\rho \sim \delta T/T \sim 10^{-5}$). Nessa época, halos de matéria escura já se aglutinavam devido à atração gravitacional sofrida, mas bárions ainda permaneciam acoplados à radiação, devido à seção de choque entre elétrons e fótons via espalhamento Thomson.

Com a recombinação dos elétrons e prótons para formar HI, o universo tornou-se “transparente” à radiação, uma vez que não havia mais elétrons disponíveis para alterar a trajetória dos fótons. Nessa época ocorreu o desacoplamento da matéria bariônica e da radiação, quando o universo tinha cerca de 380.000 anos. A partir desse momento, as perturbações de densidade puderam evoluir, chegando no regime não-linear e formando as primeiras estruturas do universo, depois de cerca de 180 milhões de anos, num período conhecido como reionização. Vários artigos e li-

vros descrevem essa parte da história do universo: uma apresentação menos técnica e mais descritiva pode ser encontrada em [8] e uma descrição técnica detalhada é apresentada, e.g., em [9, 10].

A época entre o desacoplamento e a reionização é conhecida como “Idade das Trevas” (IdT), uma vez que ainda não tinham sido formadas as primeiras estrelas e somente fótons com energia correspondente ao infravermelho e pequenos aglomerados de hidrogênio (H) e hélio (He), em processo de crescimento, povoavam o universo. A IdT corresponde, aproximadamente, ao intervalo de tempo entre o desacoplamento ($t = 380.000$ anos) até o final da reionização ($t \approx 10^9$ anos e equivale a um intervalo de *redshift* $1100 \lesssim z \lesssim 6$).

Da recombinação à reionização, o universo era constituído, essencialmente, H, He e traços de lítio (Li), na proporção aproximada de 75% para 25%, e era neutro. A história da evolução da matéria e da transição da evolução das flutuações de densidade do regime linear para o não-linear pode ser traçada através da distribuição de HI no intervalo de *redshift* $20 \leq z \leq 6$.

O estudo da IdT possui várias motivações, entre elas o estudo do universo quando as perturbações passaram do regime de colapso linear para não-linear; a possibilidade de encontrar estrelas muito antigas (as chamadas Pop III) e estudar a influência dos primeiros quasares e estrelas extremamente massivas em sua vizinhança.

A cosmologia de 21 cm é, provavelmente, nossa melhor aposta para estudar os fenômenos acima numa época do universo em que os objetos formados encontravam-se tão distantes de nós que o sinal emitido é praticamente inacessível para os instrumentos existentes hoje. Mesmo na próxima década, talvez somente instrumentos com o nível de tecnologia do James Webb Space Telescope atinjam a sensibilidade para detectar sinais na faixa óptica ou infravermelha, cuja intensidade permita o estudo detalhado dos fenômenos de formação de estruturas que ocorreram no final da IdT.

2.1 A física da transição hiperfina de 21 cm

Apesar de ser o elemento mais abundante do universo, a detecção de HI em distâncias extragalácticas e cosmológicas é uma tarefa bastante desafiadora, uma vez que a intensidade da transição hiperfina causada pela inversão do spin do

elétron é extremamente fraca (cerca de 5×10^{-6} eV), comparada, por exemplo, com a energia de ionização do H (-13,6 eV). A frequência de emissão é muito bem determinada: 1420,406 MHz, que corresponde a um comprimento de onda $\lambda = 21,106$ cm. Porém, essa transição é extremamente improvável, uma vez que um átomo emite um fóton em 21 cm a cada 10^{15} s ($\sim 30 \times 10^6$ anos), o que sugere o sinal extremamente fraco. Entretanto, o fato de existir uma enorme quantidade de átomos de H faz com que a intensidade do sinal seja detectável, e mais provável de ser observado em *redshifts* maiores, quando havia uma maior quantidade de HI, apesar da intensidade decair proporcionalmente ao quadrado da distância à fonte.

A transição de 21cm pode ser observada tanto por emissão quanto por absorção, e estes dois processos são governados pela interação entre o campo de radiação local e a distribuição da população de HI nos estados paralelo e anti-paralelo (conforme Figura 2), dada por

$$\frac{n_1}{n_0} = \frac{g_1}{g_0} e^{T_*/T_s} \quad (1)$$

em que n são as densidades numéricas nos estados paralelo e anti-paralelo, g são as funções de partição, T_* é a temperatura do meio e T_s é a temperatura de spin, que define o número de ocupação relativo entre os 2 níveis hiperfinos. T_s é a variável relevante para que o sinal de 21 cm seja diferente de zero.

O deslocamento Doppler devido às distâncias cosmológicas faz com que a frequência de emissão da transição de 21 cm seja deslocada para valores mais baixos. Assim, a frequência de detecção definida pelos radiotelescópios que estiverem observando a distribuição de HI seja imediatamente transformada em informação sobre a velocidade e a distância (ou *redshift*) da fonte emissora. Por simplicidade, sempre vamos nos referir à "linha de 21 cm", mesmo quando estivermos falando de medidas cosmológicas, cuja frequência observada será sempre inferior à 1420 MHz.

Um radiotelescópio mede a temperatura de brilho, T_b , cuja intensidade na origem é reduzida em função do *redshift*,

$$\begin{aligned} T_b'(z) &= T_b(z)(1+z) \\ &= T_s e^{-\tau_\nu} + T_\gamma(z)(1 - e^{-\tau_\nu}) \end{aligned} \quad (2)$$

Nesse contexto, T_γ é a temperatura da CMB e τ_ν é a profundidade óptica para uma nuvem de H, e

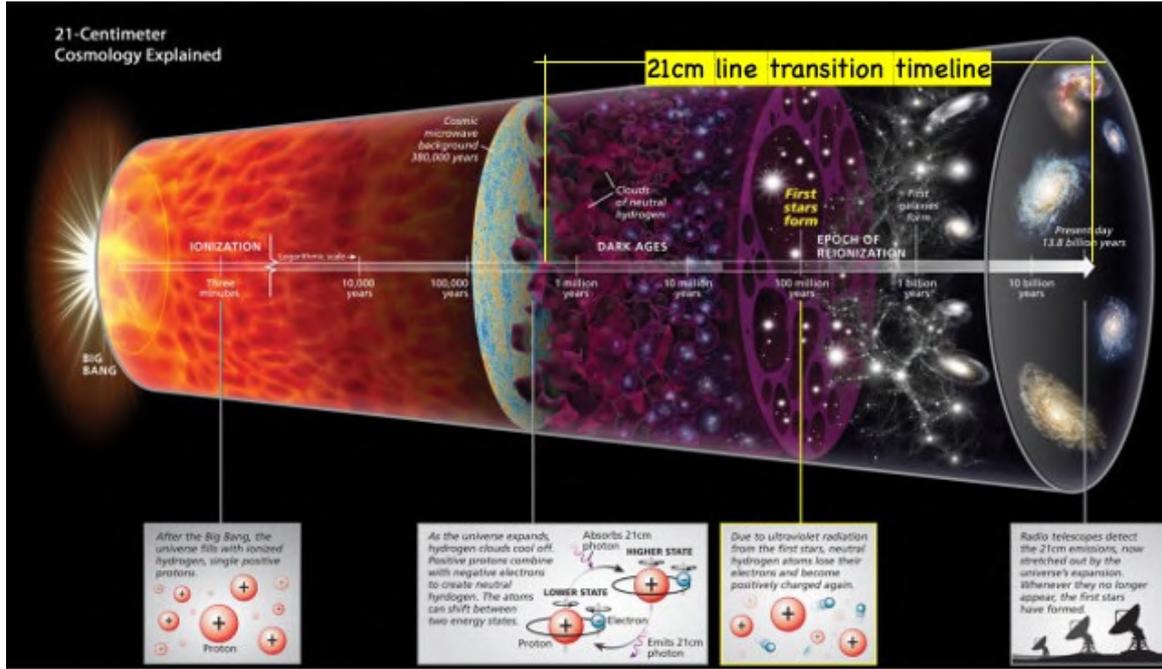


Figura 2: Linha do tempo do universo, com os principais eventos da história da formação de estruturas associado ao comportamento do hidrogênio. Em destaque, a linha do tempo da transição de 21 cm. Créditos: Roen Kelly. Fonte: <https://www.discovermagazine.com/the-sciences/chasing-the-universes-first-generation-of-stars> (versão adaptada pelo autor).

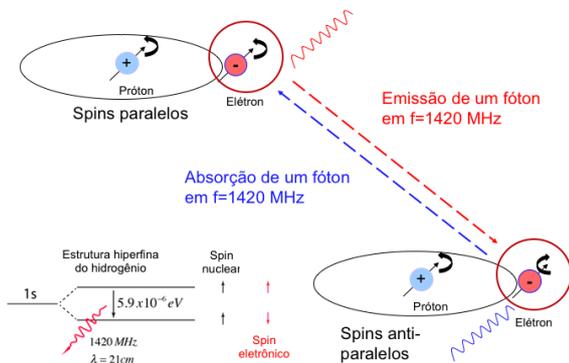


Figura 3: Esquema da transição hiperfina do átomo de hidrogênio.

pode ser expressa em termos dos coeficientes de Einstein. Um observador está interessado nas flutuações da temperatura de brilho $\delta T_b = T_b - T_\gamma$. Considerando uma pequena profundidade óptica, a Eq. (2) pode ser reescrita na forma

$$\delta T_b(z) = \frac{T_s - T_\gamma(z)}{(1+z)} \tau_\nu \quad (3)$$

Fazendo algumas considerações sobre a expressão para a profundidade óptica em termos de variáveis astrofísicas e cosmológicas, conforme discutido em [5,6], podemos escrever a temperatura de

brilho na forma

$$\delta T_b(\nu) \approx 9X_{HI}(1 + \delta_b) \left[1 - \frac{T_\gamma(z)}{T_S} \right] \times (1+z)^{1/2} \left[\frac{H(z)/(1+z)}{dv_{||}/dr_{||}} \right] \text{ mK} \quad (4)$$

Os termos na primeira linha da Eq. (4) correspondem às contribuições astrofísicas: X_{HI} é a fração de HI, $(1+\delta_b)$ descreve o excesso de densidade de bárions, $T_\gamma(z)$ corresponde à temperatura da CMB no *redshift* z e T_S é a temperatura de spin. Os termos na segunda linha descrevem as contribuições cosmológicas: $H(z)$ é o parâmetro de Hubble, e $dv_{||}/dr_{||}$ corresponde ao gradiente de velocidade da distribuição de HI ao longo da linha de visada. T_S é determinada pelo campo de radiação em que a distribuição de H está imersa, e flutua em torno de $T_\gamma(z)$.

A diferença entre ambas determina qual será o processo dominante: absorção, emissão ou ausência de flutuações em T_b . Para *redshifts* maiores, $T_\gamma(z) = T_{CMB}$ e emissão é o processo dominante. Para *redshifts* menores, $T_\gamma(z) = T_{Ly-\alpha}$ é a absorção que domina.

É possível definir T_S como uma combinação linear de várias temperaturas, em que cada uma domina numa certa época. Os processos físicos relevantes ocorrem sempre em contraponto

à temperatura do campo de radiação da CMB, e são, essencialmente: a interação direta com a CMB (que produz, principalmente absorção, mas também emissão estimulada), o acoplamento colisional, principalmente entre átomos de H, mas também entre H e HE, e o efeito do espalhamento por fótons Lyman- α , conhecido como acoplamento Wouthuysen-Field (W-S), quando a absorção e reemissão de fótons Ly- α misturam os estados hiperfinos. O efeito W-S é discutido em detalhes em [11]. Na condição de equilíbrio,

$$T_S = \frac{T_\gamma^{-1} + x_\alpha T_\alpha^{-1} + x_c T_K^{-1}}{1 + x_\alpha + x_c}, \quad (5)$$

em que x_c é o coeficiente de acoplamento colisional para a interação H-H e H- e^- e x_α caracteriza o acoplamento W-S. T_γ é a temperatura da CMB, T_α é a temperatura do campo de radiação Ly- α e T_K é a temperatura cinética associada campo de radiação ultravioleta. Uma descrição bastante detalhada deste processo pode ser encontrada em [12]. A evolução das flutuações de T_b [Eq. (4)] em função dos termos da Eq. (5) e sua associação com os processos físicos correspondentes pode ser vista na Figura 4.

T_b é a grandeza mensurável relevante na cosmologia de 21 cm. Ela é diretamente derivada da equação de transferência radiativa (tratada em diversos livros-texto de física e astronomia, e.g., [13]). A seguir veremos como essas medidas são feitas e como interpreta-las à luz do modelo cosmológico padrão.

3 Os observáveis cosmológicos

As flutuações na distribuição de HI permitem traçar a evolução da dinâmica da matéria e da formação de estruturas, quando as perturbações da matéria encontram-se no regime não linear, permitindo que o estudo da emissão difusa em 21 cm coloque o modelo Λ CDM à prova. Da mesma forma que as flutuações da CMB, em $z=1100$, e levantamentos das estrutura em grande escala, em $z < 1$, a distribuição de HI em $z > 10$ pode ser usada como sonda cosmológica. Entre a superfície de último espalhamento e a época da formação dos primeiros objetos, a linha de 21 cm é o único observável cosmológico a que podemos ter acesso.

Já vimos que T_b depende sensivelmente das condições do MIG (Seção 2). Qualquer alteração no cenário padrão de absorção ou aquecimento do

MIG (por efeitos de emissão Ly- α e raios X) implica numa distorção da curva mostrada na Fig. 4, que pode indicar fenômenos exóticos como o decaimento de matéria escura, espalhamento entre bárions e matéria escura ou emissão de raios X por buracos negros primordiais [14]. Resultados que contemplam a interação entre matéria escura e bárions, por exemplo, foram reportados em [15] e discutidos em [16, 17].

A temperatura do HI é extremamente baixa ($E_{21cm} = 5,9 \times 10^{-6}$ eV, o que implica em $T_{21cm} = 0,068K$), o que implica qualquer perturbação no campo de radiação causado por fontes de UV ou raios X atrás da região de HI altera T_b . Podemos tratar a transição em 21 cm como um calorímetro extremamente sensível a processos físicos que modificam T_S .

4 Mapeamento de intensidade: uma forma eficiente de medir a distribuição de HI

Levantamentos de galáxias nas faixas óptica e infravermelho do espectro eletromagnético são extremamente eficientes no estudo da estrutura em grande escala no universo próximo ($z \lesssim 2$) e, entre os resultados de grande impacto das últimas 3 décadas com estes levantamentos, podemos citar a detecção de BAO [18–20].

Levantamentos espectroscópicos no óptico são feitos a partir da separação da radiação coletada pelo telescópio por um espectrômetro em diferentes comprimentos de onda. Eles são extremamente eficientes na identificação dos *redshifts* de objetos individuais, mas requerem anos para a produção de um catálogo de boa qualidade, devido ao tempo exigido para observação e determinação do *redshift* de cada objeto. Levantamentos fotométricos estimam o *redshift* a partir da medida da intensidade com diferentes filtros (correspondendo a bandas de comprimento de onda diferentes) no óptico e no infravermelho. A determinação da intensidade \times comprimento de onda para cada filtro fotométrico é calculada e comparada com a intensidade modelada a partir de uma biblioteca de modelos de síntese de população estelar em galáxias, escalonados para diferentes *redshifts*.

Levantamentos de galáxias são ferramentas extremamente poderosas, mas possuem algumas deficiências intrínsecas. Por exemplo, a resolução

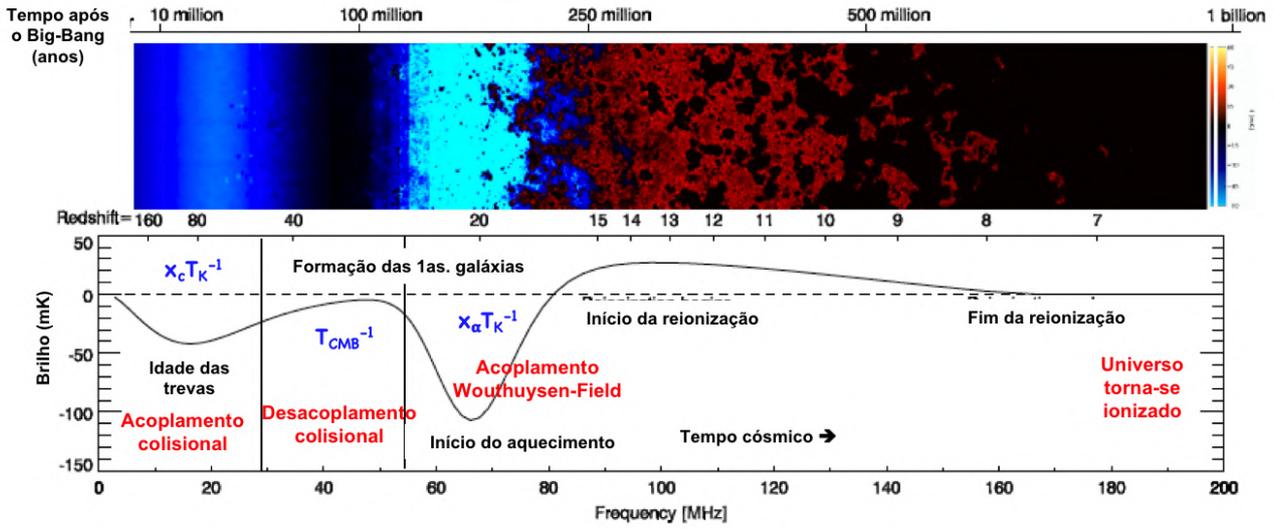


Figura 4: Em cima: Representação do processo de ionização do meio intergaláctico (MIG) em função do tempo cósmico. Na escala de cores, preto corresponde à ausência de flutuações, azul indica um MIG frio e vermelho, um MIG aquecido. Embaixo: Flutuação da temperatura de brilho T_b nas diferentes épocas, com os efeitos relevantes à variação de T_S e as componentes da Eq. (5) identificados. Para referência, o eixo x representa as frequências *redshiftadas* de observação do HI, permitindo uma associação direta com z e com o tempo cósmico. Adaptada de [6].

angular da ordem de segundos de arco permite gerar imagens com uma qualidade de detalhes assombrosa, mas a mesma resolução faz com que a cobertura profunda de uma grande região do céu ($> 10\%$) leve vários anos de observação. Um outro ponto é que os levantamentos produzem catálogos de objetos individuais, não utilizando boa parte do sinal coletado pelo telescópio durante as observações.

Uma alternativa recente aos grandes levantamentos ópticos é a técnica conhecida como mapeamento de intensidade (em inglês, *intensity mapping* - IM), bem estabelecida ao longo da década passada (ver, e.g, [21–24]) e apontada como uma área promissora na seção Discovery Areas do Decadal Survey 2020, publicado no final de 2021 [25]. IM permite o mapeamento de volumes muito maiores do universo de forma mais econômica e rápida, medindo todas as fontes que emitem em uma determinada frequência, em vez de detectar objetos específicos, visíveis apenas acima de um determinado limite de fluxo.

Adicionalmente, a observação de uma grande fração do céu (10 – 40%) e a escolha de um intervalo de frequências que permita uma boa profundidade radial em termos do *redshift* de interesse (tipicamente da ordem de centenas de MHz, em frequências abaixo de 1 GHz), possibilita o mapeamento de um volume significativo do universo,

da ordem de dezenas de Gpc³, na escala de tempo de um ano.

Essa opção é bastante vantajosa para estudar objetos muito fracos ou muito extensos (muito maiores que o campo de visada do telescópio) e possibilita o estudo da formação e evolução universal de galáxias. Levantamentos de IM feitos com radiotelescópios com resolução angular da ordem de $\sim 30' - 1^\circ$, correspondentes às escalas cosmológicas de interesse (como a escala de BAO), permitem que uma grande área do céu seja observada e que toda a radiação emitida numa determinada transição atômica seja utilizada no IM, independente da emissão ser difusa ou concentrada em um único objeto.

O espectro de potência do IM pode ser escrita como

$$P_k(z) = \langle I(z) \rangle^2 b^2(z) P_m(k, z) + P_{shot}(z), \quad (6)$$

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

$$\begin{aligned} I(z) &\propto \int_0^\infty L \Phi(L, z) dL, \\ P_{shot} &\propto \int_0^\infty L^2 \Phi(L, z) dL, \end{aligned} \quad (7)$$

$\Phi(L, z) \equiv dn(z)/DL$ é a função de luminosidade da linha. O espectro de potência da linha de emis-

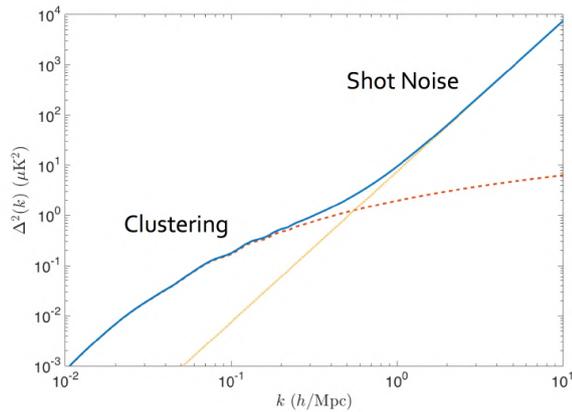


Figura 5: Contribuições do sinal da aglutinação da matéria e do ruído referente à distribuição poissoniana dos objetos (*shot noise*) para o espectro de potência de IM. Fonte: Ref. [24]

são é determinado pelos processos astrofísicos que acontecem no ambiente em que os elementos estão imersos, variando em diferentes *redshifts*. A Figura 5 mostra as escalas em que as diferentes componentes dominam.

Além das medidas de 21 cm, o mapeamento de intensidade pode ser realizado com transições de outros elementos ou moléculas, como CO, CII e Ly- α . Como essas transições são sensíveis a diferentes temperaturas e estão localizadas em diferentes regiões dentro das grandes estruturas cósmicas, elas mapeiam diferentes ambientes, sujeitos a diferentes processos físicos, trazendo uma compreensão mais detalhada do processo de formação estelar e das grandes estruturas em altos *redshift*.

As principais vantagens de se realizar levantamentos de IM com HI ou outras moléculas são: 1) cobre grandes volumes do universo visível em um tempo significativamente menor do que levantamentos ópticos; 2) a “pior” resolução angular automaticamente permite um campo de visada maior; 3) mede flutuações espaciais do fluxo integrado de muitas fontes não resolvidas, em vez de rastreá-las uma a uma; 5) sensível a todos os objetos que emitem em uma determinada linha, em vez de ser limitado por um fluxo mínimo; 6) a frequência da linha de emissão é diretamente associada ao *redshift*.

4.1 IM com a transição de 21 cm

A transição de 21 cm é a principal linha espectral em observações astronômicas em frequências

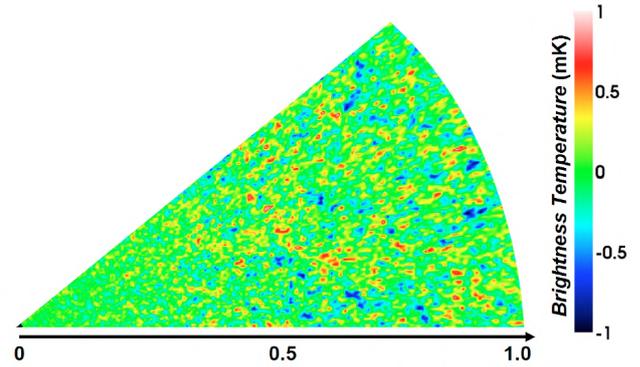


Figura 6: Simulação de $\delta T_b(21\text{cm})$ para um mapeamento de intensidade no intervalo de *redshifts* $0 \leq z \leq 1$. A emissão é suavizada com uma gaussiana na escala de $8h^{-1}$ Mpc. A relação entre *redshift* e frequência é dada por $\nu = 1420(1+z)^{-1}$ MHz. Sobredensidades de matéria estão representadas em vermelho e subdensidades, em azul. Fonte: Ref. [23].

abaixo de 1420 MHz e é uma transição isolada (no sentido de que ela não faz parte das chamadas “florestas” de linhas de emissão). Isso permite a associação direta da relação “intensidade \times frequência” com “densidade de HI \times *redshift*”. Espera-se que nessa década sejam obtidas as primeiras medidas diretas de δT_b para a transição de 21 cm; detecções indiretas, através da correlação cruzada com levantamentos ópticos já foram reportadas em 2008 [26].

Entretanto, mesmo sendo o H o elemento mais abundante no universo, o sinal esperado para flutuações na intensidade medida de 21 cm é extremamente fraco ($\delta T_b \sim 200 \mu\text{K}$), tornando a detecção direta via IM uma tarefa desafiadora, como sugere a Figura 6, que simula as flutuações do sinal de 21 cm em $0 < z < 1$. A amplitude do sinal aumenta para *redshifts* maiores, mas a distância também é maior e o número de contaminantes ao longo da linha de visada aumenta... Realmente desafiador!

Além da baixa intensidade de δT_b , existem diversos desafios para um IM eficiente. O primeiro é a natureza não gaussiana do sinal, que dificulta o processo de separação de componentes, que também possui características não-gaussianas. O sinal acumulado de fontes contaminantes entre a região emissora de 21 e o observador (em inglês, *foregrounds*) é, talvez, o principal obstáculo na produção de um IM de boa qualidade para estudos cosmológicos. A banda de radio frequências (RF) abaixo de 1 GHz é dominada por emissão síncrotron e emissão livre-livre (bremsstrahlung),

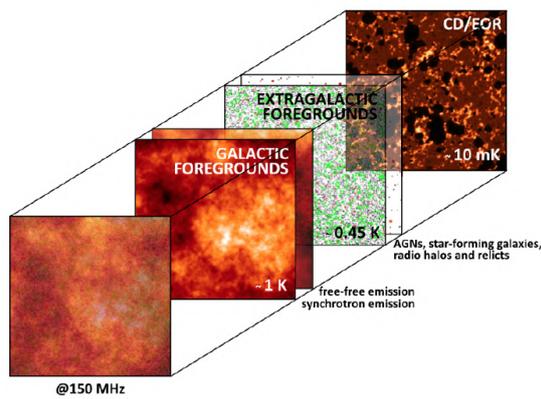


Figura 7: Ilustração de diferentes componentes de *foregrounds* para um experimento de 21 cm em redshift correspondente à frequência de 150 MHz. Créditos: Adaptada da Ref. [28].

cuja intensidade, em 1 GHz, é $\sim 10^3 - 10^4$ mais intensa que o sinal de HI.

A emissão de radiofontes extragalácticas e da CMB também são potenciais contaminantes do sinal de 21 cm e devem ser removidos antes da produção de um mapa para fins cosmológicos. Este processo é conhecido na literatura como separação de componentes; discussões detalhadas sobre limpeza de *foregrounds*, separação de componentes e aplicações/análises simuladas em experimentos podem ser encontradas, por exemplo, em [27–30].

Um exemplo da superposição de *foregrounds* em uma simulação de experimento medindo a emissão de 21 cm em 150 MHz, com as intensidades de cada componente pode ser vista na Figura 7. Note que a intensidade correspondente a T_b é 10mK , cerca de 50 vezes mais intensa do que o valor estimado para δT_b ($\sim 200\mu\text{K}$).

Um segundo problema, que vai se tornando mais complexo de lidar com o passar dos anos, é a interferência gerada pelo grande número de serviços de RF disponibilizado pelo homem em bandas antes reservadas para a radioastronomia.

Além da escolha de um sítio distante de grandes centros urbanos e de estratégias para evitar os sinais emitidos por *transponders* da aviação civil e por satélites geoestacionários (um grande problema em sítios localizados próximos à linha do Equador), é sempre adequado a solicitação de uma zona de silêncio em torno do sítio escolhido, com raios de exclusão delimitando o nível de emissão aceitável e a presença de emissores nocivos à atividade do radiotelescópio. No caso especí-

fico do radiotelescópio BINGO, os critérios definidos para essa zona de exclusão são apresentados em [31].

Ainda assim, mesmo que fosse possível remover todos os *foregrounds* astronômicos e a contaminação humana em RF, o principal requisito para uma boa determinação do sinal de 21 cm através do IM é uma medida que cubra um volume grande do universo. Particularmente, medidas que explorem escalas da ordem de 1 Giga parsec (Gpc) ou mais, na direção radial, são fundamentais para estudos cosmológicos, por permitirem o estudo da evolução da aglutinação das grandes estruturas do universo. A próxima seção discutirá os instrumentos utilizados para essas medidas.

5 A instrumentação para a cosmologia de 21 cm

Os objetivos científicos de um levantamento via IM definirão o tipo de instrumentação adequada. Se considerarmos formação de galáxias e a época da recombinação, certamente instrumentos operando em frequências mais baixas e com boa resolução angular são a escolha adequada. Se considerarmos o estudo da EE, instrumentos operando em frequências acima de 700 MHz ($z \leq 1$) darão melhores resultados.

BAO e RSD podem ser bem determinados no intervalo de número de onda $0,07 \lesssim k \lesssim 0,5$ (sendo $k = 2\pi/\lambda$). Para *redshifts* mais baixos (frequências mais altas) a interferência de RF será um problema maior do que para *redshifts* maiores (frequências mais baixas) que sofrerão com uma resolução angular pior e uma emissão galáctica muito mais intensa, como discutido na Seção 4.1.

Os interferômetros são os instrumentos mais adequados para realizar IM na resolução angular de $\sim 0,5^\circ$, cobrindo áreas muito grandes do céu. No entanto, eles também exigem hardware caro, uma eletrônica sofisticada e sistemas de cronometragem para fazer as correlações necessárias. Várias abordagens foram propostas para realizar pesquisas de IM usando arranjos de interferômetros em vez de um único refletor (veja, por exemplo, [32, 33]).

Telescópios com um único refletor (doravante, do inglês, *single dish* - SD) e receptores estáveis podem ser uma abordagem de custo significativamente mais baixo (por até um fator 100) e boa eficiência para estudos de BAO usando IM em

$z \lesssim 0,5$ [34]; o radiotelescópio BINGO, que será apresentado na Seção 6 pertence a esta classe. Uma discussão detalhada sobre as vantagens e desvantagens de ambos para levantamentos em $redshifts \leq 1$ pode ser encontrada em [35].

Alguns interferômetros e telescópios SD estão sendo (ou foram) construídos com o objetivo primário de realizar um levantamento dedicado de HI usando IM. Considerando que a qualidade dos receptores que serão usados permite observação em uma banda de frequência de centenas de MHz operando a uma temperatura de sistema $T_{sys} \lesssim 25$ K, e que o tempo de observação não será um requisito importante (considerando que são instrumentos dedicados a este fim), os parâmetros principais a serem preenchidos para um instrumento ser competitivo são:

1. area coletora $> 500 m^2$;
2. grande cobertura no céu ($> 1000^\circ$ quadrados);
3. baixa contaminação por lobos laterais;
4. intervalo de frequências adequado (correspondendo a $z_{min} - z_{max}$) numa faixa de interesse para os fenômenos a serem observados;
5. no caso de interferômetros, configuração das linhas de base máxima e mínima e fator de preenchimento (que leva em conta o espaçamento entre as antenas).

Para efeito de comparação, a Figura 8 mostra a resolução angular de alguns experimentos de IM planejados para o futuro próximo, ou já em operação em função de $redshift$. Nessa comparação não consideramos o SKAO nem o telescópio FAST. O BINGO possui uma superposição em redshift com os telescópios Tianlai e FAST (não listado). O telescópio Tianlai está operando com seus protótipos e sua equipe já publicou uma série de artigos de caracterização do instrumento.² O telescópio SKA deverá entrar operação somente após 2026. Nossas estimativas indicam que o BINGO poderá oferecer boas contribuições ao estudo de FRB, produzindo dados com a mesma qualidade de seus concorrentes na mesma banda de redshift.

Experimentos de IM podem produzir resultados melhores do que os levantamentos ópticos de galáxias? A resposta é sim, mas às custas de

²<http://tianlai.bao.ac.cn/publications.html>

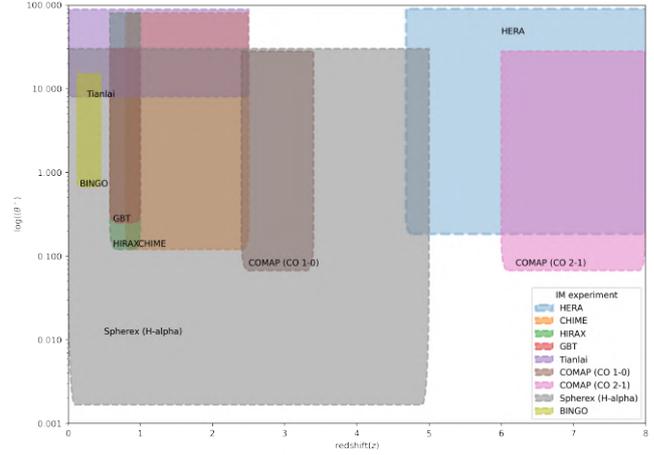


Figura 8: Resolução angular em função do $redshift$ para diferentes *surveys*, tanto em operação como em construção.

uma escolha delicada de parâmetros, que envolve a frequência máxima de operação (mais próxima de $\nu_0 = 1420$ MHz) ou uma resolução angular que cubra pequenas escalas. Para o estudo de EE, mapear fenômenos em $z > 1,0$ não traz informações muito mais relevantes, embora o volume coberto seja muito maior. O estudo de $redshifts \ll 0,1$ também não oferece muitos ganhos, porque a interferência em RF aumenta e outras fontes de informação sobre a distribuição de matéria (e.g., levantamentos ópticos) já existem e possuem qualidade muito boa.

Os requisitos de competitividade definem os limites máximo e mínimo de sensibilidade para os números de onda k_{\parallel} e k_{\perp} . As escalas radiais ($k_{\parallel}^{min}, k_{\parallel}^{max}$) dependem, respectivamente, da sensibilidade à remoção de *foregrounds* (k_{FG}) e da capacidade de modelar a componente não-linear do espectro (k_{NL}),

$$\begin{aligned} k_{\parallel}^{min} &\sim k_{foreg} = 2\pi/(r_{nu}\Delta\tilde{\nu}_{tot}) \\ k_{\parallel}^{max} &\sim k_{NL} = 1/\sigma_{NL} \end{aligned} \quad (8)$$

em que $(r_{nu}\Delta\tilde{\nu}_{tot})$ é a resolução total do levantamento em IM e σ_{NL} é um efeito de dispersão não linear nas velocidades que define uma região de corte em sensibilidade àquelas escalas. Note que não há diferença para interferômetros e telescópios SD.

As escalas transversais ao plano do céu ($k_{\perp}^{min}, k_{\perp}^{max}$) dependem de parâmetros ligados à geometria do telescópio, tais como área coletora, campo de visada (FoV) e dimensões do espelho (ou das linhas de base do interferômetro. Para

um radiotelescópio SD,

$$\begin{aligned} k_{\perp}^{\min} &\sim k_{area} = 2\pi/\sqrt{r^2 S_{area}}, \\ k_{\perp}^{\max} &\sim k_{FOV} = 2\pi D_{espelho}/r\lambda, \end{aligned} \quad (9)$$

e para um interferômetro,

$$\begin{aligned} k_{\perp}^{\min} &\sim k_{D_{min}} = 2\pi D_{min}/r\lambda, \\ k_{\perp}^{\max} &\sim k_{D_{max}} = 2\pi D_{max}/r\lambda, \end{aligned} \quad (10)$$

em que r é a distância co-móvel, λ é o comprimento de onda associado à uma determinada frequência na banda de operação do instrumento, S_{area} é a área coberta pelo levantamento de IM, $D_{espelho}$ é o diâmetro de cada refletor (para o interferômetro ou radiotelescópio SD) e D_{min} , D_{max} são as linhas de base máxima e mínima da configuração do interferômetro.

Bull e colaboradores [35] resumiram de forma bastante didática na Figura 9 esse delicado jogo de parâmetros, apresentando os intervalos de validade das escalas (k_{\parallel} , k_{\perp}) para os dois tipos de experimento na parte superior da figura. Telescópios SD são mais sensíveis a escalas menores, valendo o contrário para os interferômetros. Nessa figura é importante destacar que a linha de base mínima de um interferômetro é exatamente o diâmetro do refletor de seu telescópio. Isso quer dizer que a sensibilidade de interferômetros para k_{\perp} começa em k_{area} e termina em $k_{D_{max}}$.

A parte de baixo da Figura 9 apresenta a sensibilidade à detecção de BAO para cada tipo de instrumento. Nesse caso, além da sensibilidade para as escalas de k , a sensibilidade ao intervalo de *redshifts* observado também é relevante. Telescópios SD são sensíveis ao máximo da escala de BAO em $z < 0,5$, enquanto interferômetros podem, potencialmente, identificar o máximo da escala de BAO no intervalo $0,6 \lesssim z \leq 2,5$.

Uma alternativa para tornar telescópios SD mais competitivos é aumentar a sensibilidade em escalas angulares pequenas ($k > 0,1 \text{ Mpc}^{-1}$), via: 1) maior número de detectores; 2) melhor resolução angular do radiotelescópio SD; 3) redução do ruído instrumental; ou 4) aumento do tempo de duração da missão. Em tese isso traria informação adicional sobre as distâncias, a partir da forma do espectro de potência, mas exigiria uma modelagem acurada da componente não linear do espectro, o que não é trivial.

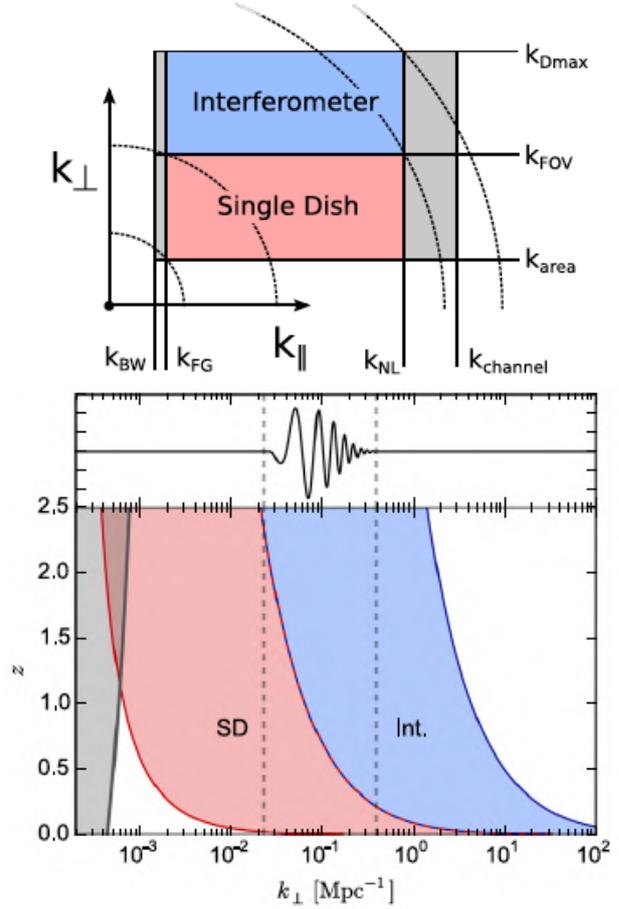


Figura 9: Em cima: Ilustração esquemática dos intervalos de k_{\parallel} , k_{\perp} a que os dois tipos de telescópios são sensíveis. As linhas pontilhadas definem os intervalos em valores absolutos de número de onda $|k|$. A área cinza à esquerda e à direita definem os limites de sensibilidade dos instrumentos. Embaixo: Região de sensibilidade ao sinal de BAO para interferômetros e telescópios SD. O máximo do sinal de BAO ocorre em $k_{\perp} \sim 10^{-1} \text{ Mpc}$. Telescópios SD são mais sensíveis para $z < 0,5 - 0,6$; interferômetros são mais sensíveis para $z > 0,7$. Fonte: Ref. [35]

6 O radiotelescópio BINGO

6.1 Descrição do instrumento

O radiotelescópio BINGO é um instrumento da classe SD, projetado para ser o primeiro instrumento a observar BAO na faixa de rádio. Ele será um telescópio de trânsito, com apontamento fixo no céu e centrado em declinação $\delta = -15^\circ$. Isso permite que a rotação da Terra seja usada para observar o céu à medida que este se desloca pelo campo de visão do instrumento (FoV), revisitando a mesma região do céu a cada dia e maximizando o tempo de observação do instrumento. Essa estratégia também torna o BINGO um excelente instrumento para o estudo de fenômenos transientes, como as rajadas rápidas em

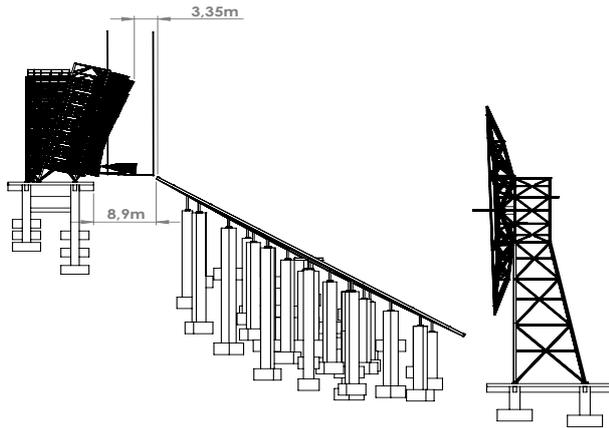


Figura 10: Vista lateral da estrutura do telescópio. A torre de sustentação dos receptores está localizada à esquerda. As distâncias marcadas na figura estão em escalas diferentes da escala do desenho de engenharia.

rádio (em inglês, *fast radio bursts* - FRB).

O sistema óptico do BINGO é constituído por um espelho primário (paraboloide) e um secundário (hiperboloide), com 40 e 34 metros de diâmetro, respectivamente, e uma distância focal de 63 m. Eles iluminam uma superfície focal em que estão dispostas 28 cornetas corrugadas acopladas aos receptores, que irão operar na temperatura ambiente, num modo de correlação total, cobrindo a faixa de frequência 980 – 1260 MHz, que corresponde a um intervalo $0,127 \leq z \leq 0,449$. A Figura 10 apresenta uma visão lateral projeto de engenharia do telescópio.

O correlacionador total combina os sinais de cada modo de polarização circular com uma fonte externa de referência, para evitar variações de ganho que possam prejudicar sua capacidade de detectar o sinal HI. A resolução angular do telescópio é de $0,67^\circ$ (FWHM) em 1100 MHz. A temperatura do sistema $T_{sys} \approx 70$ K deve permitir uma sensibilidade de $102 \mu K$ em um ano de observação, com um ciclo de operação de 60% do tempo, em 2 polarizações.

O BINGO cobre cerca de 5300 graus quadrados no céu a cada dia de observação. O telescópio está sendo construído em uma área isolada em Aguiar, Paraíba, nordeste do Brasil (Lat: $7^\circ 2' 29''$ S Long: $38^\circ 16' 5''$ W), em uma área cercada por morros, com população próxima muito pequena e quase nenhuma interferência em RF detectada nas vizinhanças do sítio. A Figura 11 apresenta uma visão artística do telescópio, numa vista oeste-leste (esquerda-direita) do local, com o morro de abrigo ao fundo. A casa de controle



Figura 11: Representação artística do radiotelescópio BINGO no sítio de Aguiar (PB).

será localizada atrás do morro.

Uma descrição detalhada do instrumento pode ser encontrada em [31].

6.2 Objetivos científicos

A configuração atual do radiotelescópio BINGO e a sensibilidade estimada de $102 \mu K$ para um ano de observação possibilitarão o estudo de diversos aspectos da cosmologia padrão, bem como incursões em variantes do modelo Λ CDM. O intervalo de *redshifts* explorado pelo BINGO corresponde a um intervalo de tempo entre 8,98 – 12,11 bilhões de anos, e a separação do sinal de HI em 2048 canais em *redshift* possibilita uma espécie de tomografia detalhada do universo no volume observado. Esse intervalo de tempo e *redshift* corresponde, no modelo Λ CDM, à época em que a EE passou a dominar a dinâmica da expansão do universo.

A medida de *redshift* com precisão de 10^{-4} permitirá uma boa estimativa das distâncias radiais e dos modos de perturbação k , transformando o BINGO em um excelente instrumento para medidas de BAO e de distorções no espaço de *redshift* (em inglês, *redshift space distortions* - RSD). Inicialmente, a análise do espectro de potência das flutuações do sinal de 21 cm deve permitir tanto a identificação do sinal de BAO quanto de RSD.

BAO são sinais impressos na distribuição de matéria, em consequência das oscilações no fluido fóton-bárion primordial, ainda na época da CMB, e são hoje consideradas uma das melhores maneiras de explorar as propriedades da expansão acelerada do universo. O sinal de BAO é observado na distribuição de galáxias em todos os *redshifts*, numa escala determinada com precisão pelas medidas da CMB: $147,21 \pm 0,23$ Mpc [36]. Como esse é um valor fixo em coordenadas co-móveis, ele é usado como uma "régua-padrão" para medir a geometria do universo e explorar os efeitos

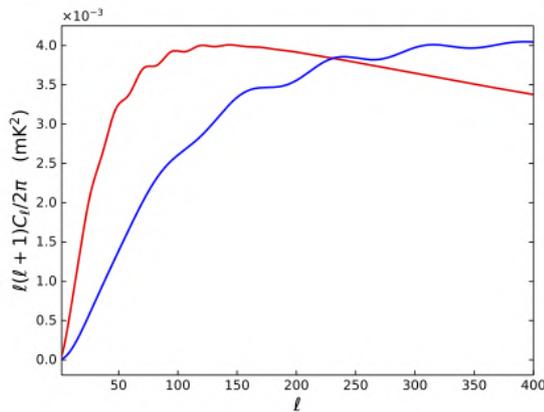


Figura 12: Espectro de potência angular da distribuição de HI usando bandas de frequência de 9,33 MHz nos *redshifts* $z = 0,127$ (vermelho) e $z = 0,449$ (azul), os limites de operação do BINGO. O efeito de BAO aparece claramente em ambas as curvas. Fonte: Ref. [39].

da EE [20, 37, 38]. BAO aparece como um pico no espaço de distâncias angulares (medido pela correlação angular) e como oscilações no espaço de multipolos (medido pelo espectro de potência angular). A Figura 12 mostra o sinal de BAO no espectro de potência angular do HI para os limites de *redshift* do BINGO.

RSD são efeitos utilizados para estimar a taxa de crescimento de estruturas, sendo observadas quando certos parâmetros cosmológicos são medidos ao longo da direção radial (co-móvel). Como a distância a eles é determinada pelo redshift observado, a contribuição das velocidades peculiares ao longo da linha de visada faz com que a distribuição desses parâmetros no espaço de *redshift* não seja isotrópica, causando as RSD. Para a estimativa de RSD, precisamos calcular $f\sigma_8$, em que $f = -d \ln \delta(z)/d \ln(1+z)$ é a taxa de crescimento e σ_8 mede a amplitude do espectro de potência linear da matéria, normalizado para uma escala de $8h^{-1}$ Mpc.

Os dados coletados pelo BINGO deverão ser analisados com diferentes ferramentas, e.g., matrizes de Fisher [40], análise de bispectro [41], funcionais de Minkowski [31], comparações entre as previsões da função de correlação de 2 pontos e do espectro de potência angular de HI [42] vão gerar previsões da capacidade do BINGO detectar efetivamente o sinal de BAO, bem como para a viabilidade de várias extensões do modelo Λ CDM tais como EE dinâmica, EE interativa, e cosmologias alternativas, como, por exemplo, gravidade modificada.

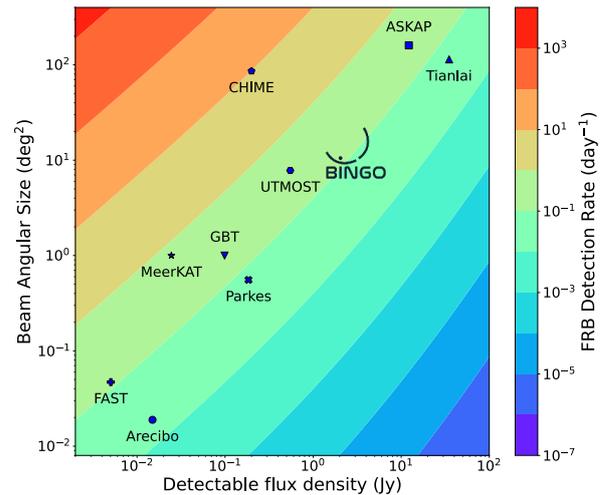


Figura 13: Estimativa da taxa de detecção de FRB por dia, em função do campo de visada e do fluxo mínimo detectável, para o BINGO e outros radiotelescópios - tanto interferômetros (ASKAP, CHIME, UTMOST, Tianlai e MeerKat) como telescópios SD (BINGO, FAST, Parkes, Arecibo e GBT). A taxa de detecção do BINGO é representada pela bolhinha dentro do logotipo, correspondente a um fluxo mínimo de 0,41 Jy ($\text{SNR} = 1$) e campo de visada de $10,5^\circ$ quadrados. Fonte: Ref. [39], adaptada da figura original da Ref. [43].

Adicionalmente o BINGO deverá ser um excelente instrumento para a análise de fenômenos astrofísicos transientes, tais como pulsares e FRB, devido às especificações de missão que preveem um longo tempo de integração (5 anos para a Fase 1) e excelente estabilidade temporal dos receptores (flutuações de ganho de 10^{-4} em escalas de tempo de algumas horas). Na configuração da Fase 1, o BINGO deverá detectar 1 FRB com relação sinal-ruído (SNR) > 3 a cada 4,6 dias, competitivo entre os instrumentos não interferométricos, conforme mostrado na Figura 13.

O trabalho de E. Abdalla e colaboradores [39] faz uma revisão detalhada das possibilidades científicas do radiotelescópio BINGO na Fase 1.

7 Considerações finais

Apresentamos neste artigo uma breve revisão da cosmologia de 21 cm, com os fundamentos teóricos da transição hiperfina do átomo de H e sua relação com a cosmologia atual, a forma como as observações são realizadas via IM, e uma descrição sucinta da instrumentação necessária para a realização de levantamentos de IM. Esperamos que esse artigo consiga despertar no leitor o in-

teresse por uma área da cosmologia que floresceu na última década e está sendo considerada como uma área promissora para a cosmologia na próxima década pelo Decadal Survey 2020 da Academia Nacional de Ciências dos EUA.

Entre os vários alvos científicos que podem ser estudados com um bom levantamento em rádio usando IM, estão o efeito da EE no processo da evolução das grandes estruturas em *redshifts* $\lesssim 0,5$; a história da evolução da aglutinação de matéria através da distribuição de HI; o mapeamento de oscilações acústicas de bárions via uma análise tomográfica ao longo da linha de visada (em k_{\parallel}) e, talvez o mais interessante: o estudo do universo durante a IdT, observando a transição de 21 cm em *redshifts* > 20 , antes da formação dos primeiros objetos. Essa é uma época na história do universo que não é acessível de nenhuma outra forma a não ser por medidas da transição de 21 cm.

Finalizamos este artigo com a apresentação do radiotelescópio BINGO, com a descrição breve do instrumento e seus principais objetivos científicos. O BINGO será um instrumento dedicado a medir a transição de 21 cm usando IM, está sendo construído no Brasil, com a maior parte dos recursos oriundos de financiamento nacional e com liderança também nacional, operando em uma banda de *redshifts* com pouquíssimos competidores. Ele deve ser um instrumento capaz de agregar astrônomos e físicos, do Brasil e do exterior, na busca de um melhor entendimento das propriedades da EE, através de medidas precisas de BAO, de RSD e da análise da correlação cruzada com levantamentos ópticos no mesmo intervalo de *redshifts*.

8 Agradecimentos

O autor agradece o convite do Prof. Júlio Fabris para redigir este artigo, aos participantes do Verão Quântico 2021 por diversos comentários e dúvidas levantadas durante as aulas, que permitiram selecionar o material usado neste trabalho e ao grupo de cosmologia experimental do INPE pelas inúmeras discussões que ajudaram a tornar a redação mais acessível a não-especialistas. O autor também agradece ao INPE, ao MCTI, ao CNPq, à CAPES e à FAPESP o suporte à pesquisa em cosmologia e, em particular, ao projeto do radiotelescópio BINGO.

Sobre o autor

Carlos Alexandre Wuensche (ca.wuensche@inpe.br) é Bacharel em Física pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Mestre em Astrogeofísica pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Doutor em Cosmologia pelo INPE, com estágio na Universidade da Califórnia, Santa Bárbara (EUA) e estágio sabático na Università degli Studi di Roma "La Sapienza". É pesquisador titular, chefe da Divisão de Astrofísica do INPE e professor da Pós-graduação em Astrofísica do INPE. Tem experiência na área de cosmologia experimental, atuando em temas ligados ao estudo da radiação cósmica de fundo (RCF). Tem interesse também na área de astrobiologia, com enfoque em habitabilidade e astroquímica. Participa de diversos projetos internacionais ligados à observação da RCF desde o início dos anos 90. Atualmente é pesquisador principal do projeto BINGO (www.bingotelescope.org).

Referências

- [1] A. Albrecht et al., *Report of the Dark Energy Task Force* (2006). [ArXiv:astro-ph/0609591](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0609591).
- [2] D. H. Weinberg et al., *Observational probes of cosmic acceleration*, *Phys. Rep.* **530**, 87 (2013). [ArXiv:1201.2434](https://arxiv.org/abs/1201.2434).
- [3] D. Huterer e D. L. Shafer, *Dark energy two decades after: Observables, probes, consistency tests*, *Rep. Prog. Phys.* **81**(1), 016901 (2018). [ArXiv:1709.01091](https://arxiv.org/abs/1709.01091).
- [4] M. Tegmark e M. Zaldarriaga, *Separating the early universe from the late universe: Cosmological parameter estimation beyond the black box*, *Phys. Rev. D* **66**(10), 103508 (2002). [ArXiv:astro-ph/0207047](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207047).
- [5] S. R. Furlanetto, S. P. Oh e F. H. Briggs, *Cosmology at low frequencies: the 21 cm transition and the high-redshift universe*, *Phys. Rep.* **433**(4-6), 181 (2006).
- [6] J. R. Pritchard e A. Loeb, *21 cm cosmology in the 21st century*, *Rep. Prog. Phys.* **75**(8), 086901 (2012). [ArXiv:1109.6012](https://arxiv.org/abs/1109.6012).

- [7] A. Mesinger (ed.), *The Cosmic 21-cm Revolution*, 2514-3433 (IOP Publishing, 2019).
- [8] T. Villela, I. Ferreira e C. A. Wuensche, *Cosmologia observacional: a radiação cósmica de fundo em microondas*, *Revista USP* **62**, 104 (2004).
- [9] J. C. Fabris et al. (eds.), *The Cosmic Microwave Background: Proceedings of the II José Plínio Baptista School of Cosmology* (Springer, Cham, 2016).
- [10] S. Dodelson e F. Schmidt, *Modern Cosmology* (Academic Press, 2020), 2^a ed.
- [11] J. Higgins, *Lyman-alpha scattering in the intergalactic medium during the epoch of reionisation*, Tese de Doutorado, University of Edinburgh, United Kingdom (2012). Disponível em <http://hdl.handle.net/1842/8805>, acesso em jan. de 2022.
- [12] S. R. Furlanetto, *The Fundamentals of the 21-cm Line* (2019). [ArXiv:1909.13740](https://arxiv.org/abs/1909.13740).
- [13] G. B. Rybicki e A. P. Lightman, *Radiative Processes in Astrophysics* (John Wiley & Sons, 1986).
- [14] S. R. Furlanetto, *Physical Cosmology from the 21-cm Line* (2019). [ArXiv:1909.12430](https://arxiv.org/abs/1909.12430).
- [15] J. D. Bowman et al., *An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum*, *Nature* **555**(7694), 67 (2018).
- [16] R. Barkana, *Possible interaction between baryons and dark-matter particles revealed by the first stars*, *Nature* **555**(7694), 71 (2018). [ArXiv:1803.06698](https://arxiv.org/abs/1803.06698).
- [17] C. Pigozzo, S. Carneiro e J. C. Fabris, *Joint analysis of EDGES 21-cm line observations with standard candles and rulers in Λ CDM and non-adiabatic gCg models*, *Physics of the Dark Universe* **28**, 100486 (2020). [ArXiv:1910.10226](https://arxiv.org/abs/1910.10226).
- [18] D. J. Eisenstein et al., *Detection of the Baryon Acoustic Peak in the Large-Scale Correlation Function of SDSS Luminous Red Galaxies*, *Astrophys. J.* **633**, 560 (2005). [ArXiv:astro-ph/0501171](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0501171).
- [19] L. Anderson et al., *The clustering of galaxies in the sdss-iii baryon oscillation spectroscopic survey: baryon acoustic oscillations in the data release 9 spectroscopic galaxy sample*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **427**, 3435 (2012). [ArXiv:1203.6594](https://arxiv.org/abs/1203.6594).
- [20] T. Delubac et al., *Baryon acoustic oscillations in the ly- α forest of boss dr11 quasars*, *Astron. Astrophys.* **574**, A59 (2015). [ArXiv:1404.1801](https://arxiv.org/abs/1404.1801).
- [21] T.-C. Chang et al., *Baryon Acoustic Oscillation Intensity Mapping of Dark Energy*, *Phys. Rev. Lett.* **100**(9), 091303 (2008). [ArXiv:0709.3672](https://arxiv.org/abs/0709.3672).
- [22] A. Loeb e J. S. B. Wyithe, *Possibility of Precise Measurement of the Cosmological Power Spectrum with a Dedicated Survey of 21cm Emission after Reionization*, *Phys. Rev. Lett.* **100**(16), 161301 (2008). [ArXiv:0801.1677](https://arxiv.org/abs/0801.1677).
- [23] J. B. Peterson et al., *21-cm Intensity Mapping* (2009), White Paper for the Astro2010 Astronomy Decadal Review. [ArXiv:0902.3091](https://arxiv.org/abs/0902.3091).
- [24] E. D. Kovetz et al., *Line-Intensity Mapping: 2017 Status Report* (2017). [ArXiv:1709.09066](https://arxiv.org/abs/1709.09066).
- [25] National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, *Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s* (The National Academies Press, Washington, 2021).
- [26] T.-C. Chang et al., *An intensity map of hydrogen 21-cm emission at redshift $z \sim 0.8$* , *Nature* **466**(7305), 463 (2010).
- [27] A. Liu e J. R. Shaw, *Data Analysis for Precision 21 cm Cosmology*, *Publ. of the Astr. Soc. Asia* **132**(1012), 062001 (2020). [ArXiv:1907.08211](https://arxiv.org/abs/1907.08211).
- [28] E. Chapman e V. Jelić, *Foregrounds and their mitigation*, arXiv e-prints arXiv:1909.12369 (2019). [ArXiv:1909.12369](https://arxiv.org/abs/1909.12369).
- [29] V. Liccardo et al., *The BINGO Project IV: Simulations for mission performance assessment and preliminary component separation steps* (2021). [ArXiv:2107.01636](https://arxiv.org/abs/2107.01636).

- [30] S. Cunnington et al., *21-cm foregrounds and polarization leakage: cleaning and mitigation strategies*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **504**(1), 208 (2021). [ArXiv:2010.02907](#).
- [31] C. A. Wuensche et al., *The BINGO Project II: Instrument Description* (2021). [ArXiv:2107.01634](#).
- [32] I. M. van Bemmelen et al., *Mid-frequency aperture arrays: the future of radio astronomy*, *PoS RTS2012*, 037 (2012). [ArXiv:1208.6180](#).
- [33] J. C. Pober et al., *The Baryon Acoustic Oscillation Broadband and Broad-beam Array: Design Overview and Sensitivity Forecasts*, *Astron. J.* **145**, 65 (2013). [ArXiv:1210.2413](#).
- [34] R. A. Battye et al., *HI intensity mapping: a single dish approach*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **434**(2), 1239 (2013). [ArXiv:1209.0343](#).
- [35] P. Bull et al., *Late-time cosmology with 21 cm intensity mapping experiments*, *Astrophys. J.* **803**(1), 21 (2015). [ArXiv:1405.1452](#).
- [36] Planck Collaboration, N. Aghanin et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astron. Astrophys.* **641**, A6 (2020). [ArXiv:1807.06209](#).
- [37] W. J. Percival et al., *Baryon Acoustic Oscillations in the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 Galaxy Sample*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **401**, 2148 (2010). [ArXiv:0907.1660](#).
- [38] L. Anderson et al., *The clustering of galaxies in the SDSS-III Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: baryon acoustic oscillations in the Data Releases 10 and 11 Galaxy samples*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **441**(1), 24 (2014). [ArXiv:1312.4877](#).
- [39] E. Abdalla et al., *The BINGO Project I: Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations* (2021). [ArXiv:2107.01633](#).
- [40] A. A. Costa et al., *The BINGO Project VII: Cosmological Forecasts from 21cm Intensity Mapping* (2021). [ArXiv:2107.01639](#).
- [41] K. S. F. Fornazier et al., *The BINGO Project V: Further steps in Component Separation and Bispectrum Analysis* (2021). [ArXiv:2107.01637](#).
- [42] C. Novaes et al., *The BINGO project VIII: On the recoverability of the BAO signal on realistic HI intensity mapping simulations*, *Submetido ao Astron. Astrophys.* (2022).
- [43] R. Luo et al., *On the FRB luminosity function – II. Event rate density*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **494**(1), 665 (2020). [ArXiv:2003.04848](#).

Como astrônomos estudam o mistério da morte das galáxias

Thiago Signorini Gonçalves

Observatório do Valongo, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

Galáxias são alguns dos objetos astronômicos mais impressionantes conhecidos. São estruturas com tamanhos de dezenas ou até centenas de milhares de anos-luz, contendo centenas de bilhões de estrelas, e imersas em um halo de matéria escura com trilhões de vezes a massa do Sol. Dadas as suas dimensões impressionantes, pode ser curioso pensar que uma galáxia apresenta um ciclo de vida. Mas sim, uma galáxia nasce, evolui e “morre”, embora o processo possa levar alguns bilhões de anos. Neste texto, vou descrever alguns dos processos que conhecemos sobre a evolução de galáxias, o que ainda estamos tentando descobrir, e como os cientistas estão trabalhando para desvendar esses mistérios.

Abstract

Galaxies are some of the most impressive astronomical objects known. They are structures with sizes of tens or even hundreds of thousands of light years, containing hundreds of billions of stars, and immersed in a halo of dark matter with trillions of times the mass of the Sun. Given its impressive dimensions, it might be curious to think that a galaxy has a life cycle. But yes, a galaxy is born, evolves and “dies”, although the process can take a few billion years. In this text, I will describe some of the processes we know about the evolution of galaxies, what we are still trying to discover, and how scientists are working to unravel these mysteries.

Palavras-chave: evolução de galáxias, morte de galáxias, astronomia.

Keywords: galaxy evolution, death of galaxies, astronomy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37204](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37204)

1 Galáxias são berçários estelares

A primeira coisa a se entender é que galáxias funcionam como gigantescas fábricas de estrelas no Universo. É ali que novas estrelas se formam.

Esse processo depende de um componente fundamental presente em galáxias: o gás hidrogênio. O elemento, que é o mais simples e o mais abundante do Universo, funciona como combustível para formação estelar. Quando o gás está suficientemente comprimido, devido à sua própria gravidade, a fusão nuclear começa a funcionar, unindo os átomos de hidrogênio para criar elementos mais pesados e gerando o que chamamos formalmente de estrelas.

Assim, podemos entender que o gás é um ingrediente sem o qual a formação estelar não pode acontecer. Quando dizemos que uma galáxia “morreu”, o que estamos indicando é que já não há mais gás hidrogênio em seu interior para alimentar a formação de novas estrelas, e vemos ali apenas estrelas mais velhas. É como uma fogueira sem lenha, quando podemos ver apenas as brasas



Figura 1: Imagem dos Pilares da Criação, uma das regiões de formação estelar mais conhecidas de nossa galáxia, obtida com o telescópio espacial Hubble. Créditos: NASA, ESA/Hubble e o Hubble Heritage Team.

do que foi um belo fogo no passado.



Figura 2: A galáxia de Andrômeda é a galáxia espiral mais próxima de nós, a cerca de 2,5 milhões de anos-luz de distância. Créditos: R. Gendler.

2 As classes de galáxias

Sabemos também que as galáxias podem ser classificadas em diferentes tipos, de acordo com seu formato. As maneiras de se classificar esses objetos dependem muito do freguês, como é frequente acontecer na ciência. Há, por exemplo, uma galáxia classificada como (R)SAB(l,nb)0⁺ [(R)SB(s)0/a] — mas esse tipo de detalhamento serve apenas aos trabalhos mais técnicos.

De modo geral, a astronomia classifica as galáxias em dois grandes grupos: as galáxias espirais e as elípticas. As espirais, como a nossa própria Via Láctea, têm um formato de disco, com braços espirais. As elípticas, por outro lado, são mais arredondadas, com um formato semelhante a um ovo ou elipse, como o próprio nome indica. As Figuras 2 e 3 mostram exemplos de galáxias espirais e elípticas.

Mas não são apenas os formatos visuais que diferenciam esses dois grupos. Há muitas décadas, já se sabe que as galáxias espirais possuem estrelas mais jovens, que nasceram há pouco tempo (em termos astronômicos claro; quando dizemos



Figura 3: NGC 1316 é um exemplo de galáxia elíptica, com o formato mais arredondado. Créditos: ESO

“jovens” queremos dizer há algumas centenas de milhões de anos, no máximo). As elípticas, por outro lado, têm sua população dominada por estrelas mais velhas. São as anciãs cósmicas.

Ora, será então que isso tem a ver com a quantidade de gás das galáxias? Claro que sim! As galáxias espirais têm 10% ou mais de seus átomos na forma de nuvens de gás, prontas para formar mais estrelas (o restante está quase todo dentro das próprias estrelas, claro). Esse percentual é muito menor em elípticas, o que explica de forma simples a ausência de estrelas jovens.

A astronomia, no entanto, não se restringe a caracterizar os astros. Nós queremos entender suas origens, do ponto de vista físico, e a pergunta evidente é: como se formam as galáxias? A formação de espirais e elípticas é distinta?

Esse foi um debate acalorado por muito tempo, e uma das principais explicações até a década de 60, aproximadamente, era que galáxias elípticas teriam se formado antes. Elas teriam nascido já com esse formato, e as espirais, que vieram posteriormente, sendo as responsáveis por formar novas estrelas atualmente.

No entanto esse modelo previa propriedades que não foram confirmadas; por exemplo, em galáxias elípticas todas as estrelas deveriam ser velhas, mas na verdade as observações mostram que existe uma grande variedade de idades ali. Um novo modelo se fazia necessário.

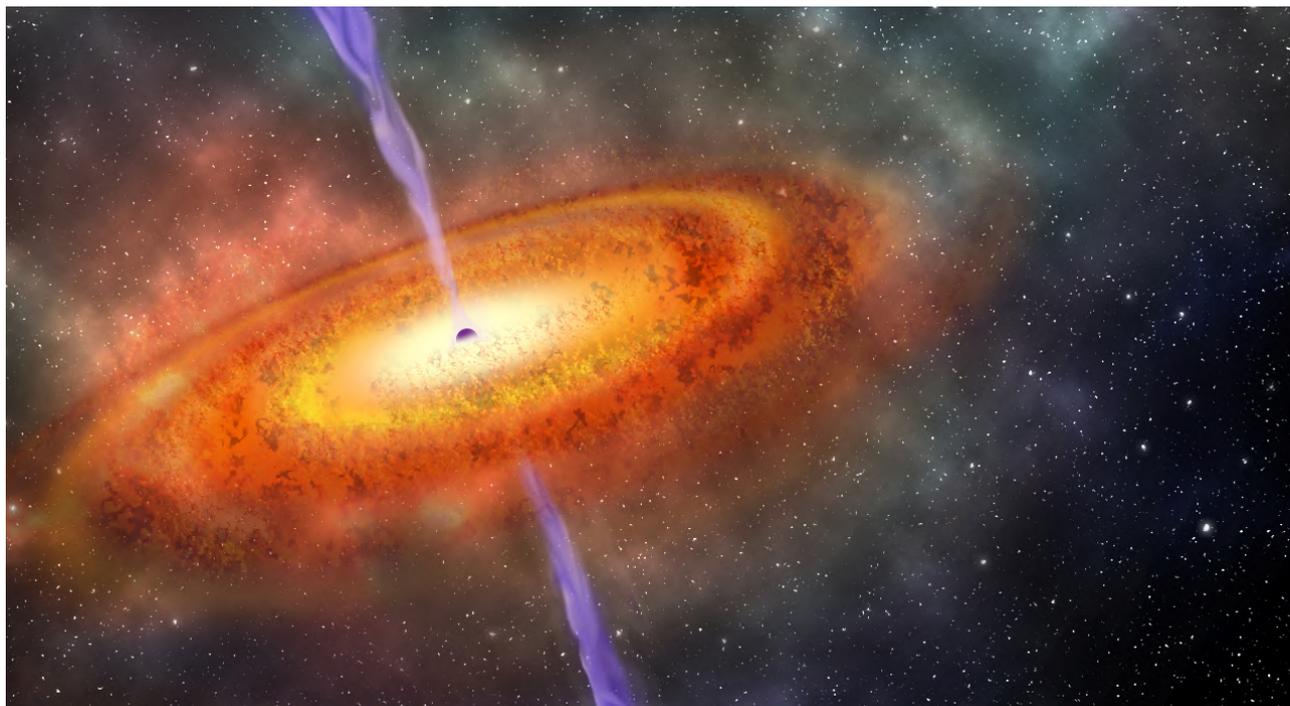


Figura 4: Impressão artística de um buraco negro produzindo um jato. Créditos: Robin Dienel/Carnegie Institution for Science.

Esse modelo, usado até hoje, é o que chamamos de formação hierárquica. As galáxias se formaram pequenas, no passado, e foram colidindo, unindo-se, fundindo-se ao longo da história do universo, formando objetos progressivamente maiores.

Ao mesmo tempo, a computação avançou a passos largos, e as primeiras simulações numéricas na década de 70 já mostravam que duas galáxias espirais colidindo dão origem a uma elíptica. É o que acontecerá com a Via Láctea, que vai se fundir com a galáxia de Andrômeda daqui a alguns bilhões de anos.

O paradigma, então é outro. As galáxias espirais se formam antes, e as elípticas são geradas pela colisão de espirais. Nesse caso, devemos ser capazes de relacionar a transformação morfológica de galáxias com suas propriedades internas: o que acontece com esses objetos para que percam seu gás durante a colisão?

2.1 Como as galáxias morrem?

Essa é a pergunta de um milhão de dólares. Literalmente, porque provavelmente quem conseguir responder de maneira definitiva deve ganhar um prêmio Nobel.

A explicação, no entanto, dificilmente será simples ou definitiva. Mesmo porque temos diver-

sas hipóteses e diferentes caminhos para, efetivamente, matar uma galáxia.

Sabemos que parte da resposta está nas colisões que discutimos antes. Essas colisões são processos complicadíssimos, com várias ramificações e efeitos físicos simultâneos. Primeiro, sabemos que interações gravitacionais entre as galáxias podem arrancar parte do gás de cada uma, o que ajuda no assassinato galáctico.

Além disso, modelos matemáticos mostram que parte do material durante as colisões acaba sendo levado para o centro da nova galáxia, gerando um buraco negro supermassivo, outro “vilão” citado frequentemente como responsável pela morte de galáxias.

Muitas vezes pensamos em buracos negros como grandes aspiradores de pó universais, que sugam tudo ao seu redor. Se por um lado a sua gravidade é, realmente, muito intensa, a área do espaço de onde nada escapa (nem a luz) é bem pequena. Comparativamente, temos uma região muito maior afetada pela gravidade do buraco negro que é agitada, energizada, aquecida, ao ponto de criar gigantescas emissões de luz e campos magnéticos poderosíssimos, que criam jatos capazes de expelir o gás de galáxias a distâncias de milhões de anos-luz (Figura 4).

Quer mais? Essas colisões muitas vezes aconte-



Figura 5: O aglomerado de galáxias ACO S 295, a 3,5 bilhões de anos-luz de distância. Créditos: NASA/ESA/Hubble/F. Pacaud/D. Coe.

cem em áreas mais “congestionadas” do universo, conhecidas como os aglomerados de galáxias (Figura 5). Compostos por centenas — ou até milhares — de galáxias, a grande densidade de objetos em um volume relativamente restrito pode aumentar a frequência com que as colisões e interações podem acontecer.

Os aglomerados também apresentam uma enorme quantidade de gás quente, a temperaturas semelhantes ao centro do Sol. Mesmo sem colidir, uma galáxia caindo neste meio pode perder seu gás através do atrito com o meio, algo como o que acontece com uma pastilha efervescente colocada em água.

Com efeito, galáxias no centro de aglomerados apresentam pouca ou nenhuma atividade de formação estelar. Independente do processo responsável, sabemos que esses ambientes são nocivos às galáxias, matando as vítimas que caem ali.

3 Descobrimo o assassino — a teoria

Na seção anterior, mostramos uma lista de possíveis culpados por matar galáxias. Como podemos ver, no entanto, a lista é extensa, e é difícil identificar o processo responsável em cada caso.

A dificuldade se deve a diversos aspectos. Primeiro, porque não temos necessariamente apenas um efeito em ação. Como nos melhores livros de detetives, pode haver uma combinação de assassinos, ou de efeitos físicos, agindo em conjunto. Dessa forma, isolar um efeito não é sim-

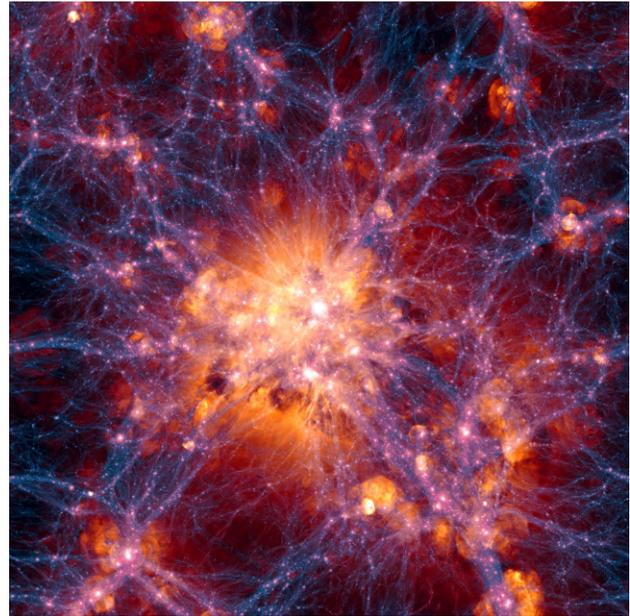


Figura 6: A imagem mostra uma região de aproximadamente 300 milhões de anos-luz, simulada em computador. Cada ponto na imagem é uma galáxia virtual. Créditos: Illustris Collaboration.

ples, mesmo porque, ao contrário de outras ciências, a astronomia não tem como colocar uma galáxia em um microscópio ou outro equipamento de laboratório para estudo; estamos sujeitos à observação passiva do universo.

Além disso, cada um desses processos age em escalas de tempo, bom, astronômicas. Galáxias podem levar mais de um bilhão de anos para deixar de formar estrelas, o que inviabiliza o acompanhamento de uma galáxia individual ao longo do seu ciclo de vida.

Uma das principais alternativas é simular a evolução de galáxias em computador. Atualmente, supercomputadores utilizam dezenas de milhões de horas de processamento (divididas, claro, entre uma enorme quantidade de núcleos) para calcular a evolução de uma galáxia e seu processamento de gás ao longo de bilhões de anos.

As inúmeras fórmulas utilizadas combinam os melhores modelos de gravidade, termodinâmica, campos magnéticos e tudo que sabemos sobre a formação de estrelas em uma simulação completa e complexa. No final, temos universos virtuais que podem servir como ponto de partida para o nosso estudo da evolução de galáxias (Figura 6).

As simulações também produzem vídeos impressionantes. Podemos visualizar em alguns minutos o que imaginamos que acontece com galá-

xias ao longo da história do cosmos, desde o Big Bang. Essas caixas virtuais podem, então, ser comparadas com nossas observações para que cientistas possam verificar a fidelidade dos modelos físicos utilizados.

4 Descobrimo o assassino — a prática

Claro, se tivéssemos certeza do que está acontecendo, não precisaríamos verificar as simulações. Não precisaríamos nem fazer ciência, já que não haveria dúvidas. Entretanto, a única forma que temos de verificar nossas previsões matemáticas é com telescópios, observando as galáxias.

Ainda assim, temos de lembrar que não podemos acompanhar em tempo real o processo físico de galáxias morrendo. Ou seja, é impossível determinar diretamente uma relação de causa e efeito entre suspeito e crime, como por exemplo a presença de buracos negros supermassivos ou a existência de um aglomerado de galáxias.

No final, nossa melhor arma é a estatística. Não podemos observar uma galáxia morrendo, mas podemos ver um grande número de galáxias “mortas” e “vivas”, formando e sem formar estrelas, e examinar suas propriedades para fazer inferências.

Podemos, por exemplo, comparar as propriedades de galáxias com e sem buracos negros, e verificar se isso afeta a quantidade de gás em seu interior. Podemos também medir as idades de estrelas de galáxias em diferentes partes de um aglomerado, determinando quão “dentro” do aglomerado ela deve estar para “morrer”, pelo menos do ponto de vista estatístico.

Notem, entretanto, que as medidas não são diretas. Não podemos pesar uma galáxia para determinar a quantidade de gás em seu interior, da mesma forma que não podemos determinar a idade de estrelas simplesmente perguntando. O conhecimento físico aí também é essencial, e podemos concluir que o aprendizado sobre o funcionamento do universo é sempre incremental. Tudo que podemos fazer na prática é medir a quantidade de luz que chega até os nossos instrumentos, e nossas descobertas prévias sobre a evolução estelar e a emissão eletromagnética dos diferentes componentes galácticos nos permite transformar as observações em medidas físicas.

5 Uma viagem no tempo

O que é mais interessante no estudo de evolução de galáxias é o nosso poder de transformar telescópios em máquinas do tempo. Podemos observar o passado do universo e reconstruir os seus quase 14 bilhões de anos como se tivéssemos um álbum de retratos cósmico.

Isso é possível porque a luz tem uma velocidade finita. Dessa forma, ao observar galáxias a bilhões de anos-luz de distância, estamos vendo uma informação que foi produzida quando o universo ainda era jovem, talvez.

Isso nos permite realizar as observações de galáxias não apenas como um produto final, vendo o resultado de toda a evolução do universo desde o Big Bang, mas também em suas etapas intermediárias. Temos esse álbum de retratos que, embora cada vez mais limitado devido às dificuldades inerentes de se observar galáxias distantes, pelo menos nos permite ter uma visão das propriedades gerais dos astros em momentos diferentes da história.

E assim como procuramos os assassinos hoje em dia, também buscamos os suspeitos em cada época. Estamos sempre querendo encontrar os buracos negros supermassivos em galáxias distantes, tentando determinar a existência dos primeiros aglomerados. É um trabalho de detetive dos mais rebuscados.

6 Os novos instrumentos

Atualmente, pode-se argumentar que o trabalho de pesquisadores que investigam a evolução de galáxias está na verdade muito mais para uma CSI¹ do que para um detetive. Afinal, dependemos fundamentalmente dos instrumentos à nossa disposição para podermos determinar o que mata uma galáxia.

Os telescópios são nosso principal instrumento, sem dúvida. São eles que nos permitem enxergar cada vez mais longe, montando nosso álbum de retratos com imagens de galáxias mais e mais longínquas, entendendo melhor o passado cósmico.

Foi o telescópio Hooker de 2,5 metros de diâmetro, por exemplo, que permitiu que Edwin Hubble descobrisse a existência de galáxias fora

¹*Crime Scene Investigation* (em português, *Investigação da cena de crime*), série transmitida recentemente na televisão.



Figura 7: Os telescópios Keck, no Havaí, com 10 metros de diâmetro cada, foram inaugurados em 1990. Por vários anos, foram os maiores telescópios ópticos do mundo. Créditos: Ethan Tweedie/W. M. Keck Observatory.

da Via Láctea e que o universo estava expandido, já na década de 1920.

O telescópio Hale, de 5 metros, foi inaugurado pouco depois da Segunda Guerra Mundial e novamente representou um grande avanço, permitindo reavaliar a distância até a galáxia de Andrômeda e medir com maior precisão a velocidade com que o universo está expandindo.

Nos anos 80 e 90, três grandes revoluções trouxeram novos avanços: a primeira foi o lançamento do telescópio espacial Hubble. Livre da interferência da atmosfera, o Hubble foi capaz de ver mais detalhes e enxergar muito mais longe, observando galáxias a bilhões de anos-luz de distância. Um feito até então impensável.

Mas ele não estava sozinho. Nesse período vimos a inauguração dos telescópios de grande porte, com espelhos que variam entre 8 e 10 metros de diâmetro (Figura 7). O tamanho avantajado permite um ganho significativo em sensibilidade, acompanhando as observações do telescópio espacial.

Por fim, outra inovação importante foi a utilização de detectores digitais, os chamados CCDs. Ao contrário das placas fotográficas, os CCDs eram capazes de guardar a maior parte da luz que os atingia, garantindo a detecção de astros muito menos luminosos.

Combinadas, as novas tecnologias nos permiti-

ram completar nosso álbum de retratos de forma esplêndida. Começamos finalmente a conhecer a juventude do universo, e a entender a formação de galáxias sem depender apenas do resultado final de todo o processo.

Vale lembrar, no entanto, que não é apenas a luz visível que utilizamos para estudar as galáxias. As nuvens de gás, por exemplo, que servem como combustível para a formação de novas estrelas, são observadas somente em microondas, exigindo a utilização de rádio-observatórios. Os buracos negros supermassivos, por outro lado, emitem grandes quantidades de energia no raio-X, exigindo a utilização de um outro tipo de telescópio espacial (como por exemplo o Chandra, lançado em 1999) para superar o bloqueio atmosférico desse tipo de radiação. Apenas observando todos esses efeitos ao mesmo tempo somos capazes de compreender todos os processos físicos acontecendo simultaneamente em galáxias.

Por último, é importante ressaltar a contribuição da informática. Como foi dito antes, as simulações computacionais são fundamentais para entendermos a evolução de galáxias do ponto de vista teórico. Na década de 70, isso queria dizer que podíamos colocar algumas dezenas de milhares de partículas em um computador e verificar o seu movimento.

Hoje, por outro lado, os supercomputadores

permitem que examinemos o comportamento de bilhões de partículas, considerando não apenas a gravidade mas todos os processos físicos relevantes acontecendo com o gás e as estrelas. É um enorme salto tecnológico, que ainda avança a passos largos.

7 O futuro da astrofísica extragaláctica

O que mais vem por aí? O futuro do campo é promissor. Estamos novamente em um momento divisor de águas, de forma comparável ao que poderíamos esperar no final da década de 80.

Se você chegou até aqui, deve gostar de astronomia, e assim deve no mínimo ter ouvido falar do telescópio espacial James Webb. Lançado recentemente, no dia 25 de dezembro de 2021, o James Webb será muito mais poderoso que o Hubble. Ele será capaz de observar as primeiras galáxias, aquelas que surgiram apenas algumas centenas de milhões de anos após o Big Bang. Esperamos assim poder, finalmente, completar nosso álbum, chegando nas primeiras estrelas e estudando o processo completo de formação e evolução de galáxias, do começo ao fim.

Acompanhando o James Webb, teremos também a nova geração de telescópios gigantes. Se o maior telescópio da atualidade tem cerca de 10 metros de diâmetro, até o final da década esperamos ter 3 telescópios gigantes em funcionamento, o maior deles com 39 metros de diâmetro. O Telescópio Extremamente Grande Europeu (sim, é esse o seu nome) será um colosso instalado no Chile, que trabalhará em conjunto com o James Webb para investigar o universo.

Devo dizer, estou animadíssimo para a próxima década. Alguns de meus colegas querem confirmar as previsões dos modelos, observando pela primeira vez as primeiras galáxias do universo e verificando o caminho que ela deve fazer para se converter em algo semelhante à nossa Via Láctea após pouco mais de 13 bilhões de anos.

Por mais que essa seja uma perspectiva incrível, eu também penso no que ainda nem pensamos em observar. Fico imaginando como as novas tecnologias vão revelar segredos ainda desconhecidos,

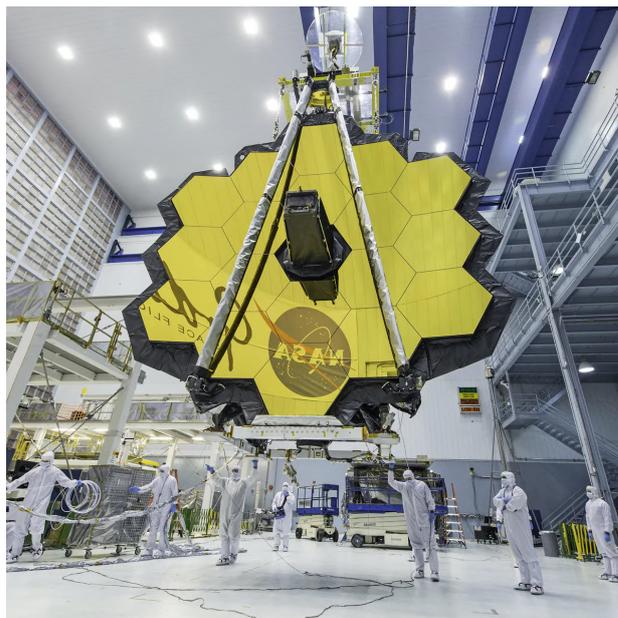


Figura 8: O telescópio espacial James Webb tem lançamento previsto para dezembro de 2021 e representa uma nova era da astronomia. Créditos: NASA/Desiree Stover.

processos que nem havíamos imaginado. E imagino se isso pode nos levar a entender, de uma vez por todas, quem é o maior assassino de galáxias no universo.

Sobre o autor

Thiago Signorini Gonçalves (tsg@astro.ufrj.br) possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (2003), Mestrado em Astronomia pelo Observatório Nacional (2004) e Doutorado em Astrofísica pelo California Institute of Technology (2011). Atualmente é professor adjunto e docente da pós-graduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Também desenvolve um amplo trabalho de divulgação científica nas redes sociais e mídias em geral, como coordenador de imprensa da Sociedade Astronômica Brasileira e publicando uma coluna semanal no site Tilt/UOL. (<https://www.uol.com.br/tilt/colunas/thiagogoncalves/>).

O modelo atômico de Bohr e o início da mecânica quântica

Alan M. Velasquez-Toribio

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Neste artigo apresentamos de forma resumida o modelo de Bohr com seus principais desenvolvimentos e a importância deste modelo para o início da mecânica quântica. Consideramos o contexto no qual a teoria de Bohr é desenvolvida e seu grande sucesso para explicar a estrutura da matéria. Discutimos sua generalização mediante a introdução das regras de quantização e a relevância do princípio de correspondência. Mostramos como o problema da interação entre átomos e a radiação eletromagnética levaram a teoria de Bohr a atingir seus limites. Também, brevemente, apresentamos a teoria *BKS* (Bohr-Kramers-Slater) com a qual ficam evidentes as inconsistências da teoria. No entanto, destacamos que a teoria de Bohr proporcionou a Heisenberg as ferramentas necessárias para formular o primeiro artigo sobre mecânica quântica.

Abstract

In this article we briefly present the Bohr model with its main developments and the importance of this model for the beginning of quantum mechanics. We consider the context in which Bohr's theory is developed and its great success in explaining the structure of matter. We discuss its generalization through the introduction of quantization rules and the importance of the correspondence principle. We show how the problem of the interaction between atoms and electromagnetic radiation pushed Bohr's theory to reach its limits. We also briefly show the *BKS* theory (Bohr-Kramers-Slater) with which the inconsistencies of the theory are also evident. However, we emphasize that Bohr's theory provides Heisenberg with the tools to formulate the first paper on quantum mechanics.

Palavras-chave: átomo, modelo de Bohr, regras de quantização, princípio de correspondência.

Keywords: atom, Bohr model, quantization rules, correspondence principle.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.35812](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.35812)

1 Introdução

Considerar a matéria como composta de átomos é uma ideia que começa na filosofia da Grécia antiga, desde aproximadamente o século V a.C. Especificamente com a proposta de Leucipo e principalmente de seu discípulo Demócrito de Abdera. Na doutrina de Demócrito o cosmos é formado por átomos, os quais são elementos fundamentais, indivisíveis e indestrutíveis que se distinguem entre si por suas características geométricas. Estes átomos imutáveis ao agregar-se ou desagregar-se produzem as diferentes estruturas do Universo.

Por outro lado, estas ideias atomistas foram fortemente criticadas pelos dois maiores filósofos da Antiguidade: Platão e Aristóteles [1]. Isto contribuiu para que inicialmente esta linha de pensamento tivesse poucos adeptos. No entanto, ainda na Antiguidade, as ideias atomistas encontraram eco na filosofia de Epicuro [2]. Em sua

obra "Cartas a Heródoto", ele defende a ideia dos átomos, os quais podem percorrer distâncias infinitas. Portanto, podem se agregar em infinitos lugares para formar mundos infinitos. Epicuro defende a ideia de mundos infinitos assim como Demócrito. Outro adepto ao atomismo, na Antiguidade, foi o poeta latino Lucrécio, que em seu poema "De rerum natura" [3] assumiu as ideias atomistas para explicar a estrutura do Universo.

Posteriormente, na Idade Média, a doutrina atomista ressurgiu nas discussões de pensadores independentes como o árabe Al-Ghazali e em diversos pensadores do Kalam árabe [4].¹ Também no ocidente, no século XIV, as ideias atomistas foram cultivadas pelo pensador cético escolástico Nicholas de Autrecourt. Em geral, na Idade Média ocidental, as ideias do átomo foram usadas

¹Kalam significa "discurso" e se refere ao estudo teológico usando as ferramentas da dialética, seria algo como a filosofia natural islâmica.

para discutir diversas questões sobre o espaço, tempo, vácuo, causalidade, etc. No entanto, as discussões foram qualitativas e não se fizeram progressos significativos com respeito à proposta original de Demócrito.

Dessa forma, as ideias atomistas chegaram com maior vigor ao ocidente. Pierre Gassendi é um dos melhores representantes do atomismo no século XVII. Por exemplo, na sua obra "Syntagma philosophiae Epicuri" [5] desenvolveu uma visão sobre a natureza fundamentada na filosofia epicurista, mas tentando conciliar conceitos sobre o átomo com a filosofia cristã. Contudo, sua abordagem foi fortemente discursiva sem considerar experimentos ou fundamentação matemática.

Por outro lado, Robert Boyle, em meados da década de 1650, começa seus experimentos sobre a elasticidade do ar tendo como base os experimentos de Torricelli e Pascal. Boyle, em conjunto com Robert Hooke, constrói e realiza experimentos com uma bomba de vácuo. Como produto destes experimentos, Boyle enuncia um importante resultado: para um dado gás sua pressão é inversamente proporcional a seu volume. Esta lei atualmente é conhecida como lei de Boyle-Mariotte² e foi fundamental para estimular ideias atomistas sobre a estrutura da matéria. Especificamente, Boyle era partidário da teoria corpuscular da matéria, uma espécie de teoria atômica.

Posteriormente, Boyle em seu trabalho "Ensaio do Nitro" [6], de 1660, mostra como uma substância pode ser decomposta e depois reintegrada misturando adequadamente suas componentes. Dessa forma, Boyle desconstrói o pensamento aristotélico e dá fundamentos experimentais à teoria corpuscular. Em seu famoso livro o "Químico cético" [7], de 1661, Boyle novamente apresenta críticas sobre a teoria dos elementos de Aristóteles e Paracelso, e para isso utiliza o personagem Carneades, defensor das ideias corpusculares da matéria. Nesta obra, Boyle, insiste que deve-se evitar introduzir discussões metafísicas na ciência. Boyle, defende a experiência como base da ciência. Neste sentido, se aproxima das ideias propostas por Bacon.

Também no século XVII, Isaac Newton, com seu livro "Philosophiae naturalis principia mathematica" [8], coloca as bases da mecânica e permite a construção de uma filosofia mecani-

cista. Newton não é exatamente um atomista, mas sim, assume a ideia corpuscular. Em seu livro "Optica" considerou que a radiação luminosa é constituída por partículas.

Neste contexto, Bernoulli em 1738 publica seu livro Hidrodinâmica no qual utiliza as leis de Newton para os fluidos. Particularmente, no capítulo X, Bernoulli apresenta o primeiro modelo cinético de um gás. Ele deriva a pressão de um gás usando a hipótese de que o mesmo é composto de pequenos átomos colidindo contra as paredes do recipiente, de tal forma, que a soma das colisões dariam origem ao conceito de pressão.

No século XVIII, a metodologia científica é desenvolvida tendo como base os resultados experimentais. Em torno de 1797, o químico francês Proust, trabalhando sobre a base das experiências de Lavoisier, estabelece a lei das proporções constantes ou definidas. Esta lei implica que para formar uma dada substância um elemento se mistura com outro elemento numa proporção constante, por exemplo, para formar água usamos 2 gramas de hidrogênio com 16 gramas de oxigênio ou 4 gramas de hidrogênio com 32 gramas de oxigênio, etc. Isto é, sempre na proporção constante de 1/8 em massa (lei de Proust).

No entanto, a teoria atômica, de fato, começa a se transformar numa teoria empírica devido ao trabalho de J. Dalton, especificamente, pelo seu influente livro "Um novo sistema de filosofia química" [9], publicado em 1808. Dalton publica a primeira tabela de pesos atômicos e desenvolve uma nomenclatura em forma de desenhos para os átomos.³ Dalton, considerou que os elementos se misturam quimicamente para formar o que ele chamou de átomos compostos, os quais atualmente chamamos de moléculas. Também considerou que átomos de um mesmo elemento não formariam átomos compostos. Assim, ele considerou, por exemplo, que moléculas como H_2 não poderiam se formar. Devido a esta hipótese, Dalton, considerou que a água tinha a fórmula HO no lugar de H_2O . Ele também propôs a chamada lei das proporções múltiplas generalizando a lei de Proust. Também, de seus experimentos, chegou a concluir que a pressão total de uma mistura de gases é a soma das pressões de cada gás, como se fossem os únicos gases presentes, isto é, a cha-

³Alternativamente à notação de Dalton o químico sueco Berzelius propôs que os elementos sejam representados por uma letra maiúscula ou no caso de precisar usar duas letras a primeira maiúscula e a segunda minúscula

²Independentemente, na França, Mariotte chega a resultados similares.

mada lei das pressões parciais.

Outra contribuição fundamental é a lei das relações simples de Gay-Lussac publicada no *Mémoires de la Société d'Arcueil* em 1808, onde propôs: "que as combinações entre si das substâncias gasosas fazem-se sempre nas relações mais simples de modo que representam um dos termos pela unidade, o outro, é um ou dois ou até três" [10]. Em concordância com estas pesquisas Avogadro, no ano de 1811, enuncia que volumes iguais de substâncias gasosas, mantendo a mesma temperatura e pressão, têm o mesmo número de moléculas. Desta forma, a relação entre as densidades dos gases resulta equivalente a relação entre suas massas. Estas mesmas conclusões são obtidas independentemente por Ampère [10].

Mesmo com estes sólidos resultados a ideia atômica sobre a estrutura da matéria gerou muitas discussões e controvérsias por parte de muitos cientistas anti-atomistas. Uma fato interessante que pode ter contribuído para estas polêmicas é a grande influência da filosofia positivista de A. Comte. Nesta linha de pensamento, uma das premissas fundamentais, consiste em afastar da ciência ideias metafísicas e estudar unicamente objetos sensíveis. Assim, como os átomos não se podiam ser observados diretamente, então estes eram parte do mundo metafísico e não do mundo físico, objeto da ciência. As discussões sobre o átomo se incrementaram na segunda metade do século XIX. Estas discussões envolvem aspectos metodológicos, epistemológicos, e até preconceitos de cientistas específicos. Um grupo em especial de grande influência eram os chamados energicistas tendo entre eles Ostwald, Mach, Duhem, Helm, entre outros [11]. Estes cientistas criticavam a teoria atômica da matéria sobre a base de suas contradições com a termodinâmica. Eles preferiam rejeitar as hipóteses atômicas em favor das sólidas leis da termodinâmica.

Adicionalmente, na segunda metade do século XIX, se começa a construir a teoria cinética da matéria com a qual a teoria atômica tem seu primeiro modelo teórico consistente. Entre os principais teóricos podemos destacar Maxwell, Boltzmann e, principalmente, Gibbs [10]. Maxwell, em 1860, deriva a distribuição de velocidade das partículas de um sistema gasoso dada pela expressão [12, 13]:

$$n_v = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{2/3} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (1)$$

onde k é a constante de Boltzmann, m a massa das partículas e T a temperatura absoluta. Este resultado é de grande importância para a teoria atômica. Usando esta distribuição se pode determinar grandezas como a velocidade média, a velocidade mais provável e a velocidade quadrática média. O interessante é que este resultado abre o caminho para construir experiências para comprovar a hipótese atômica.

Outro fenômeno que contribuiu indiscutivelmente para elucidar a polêmica sobre o átomo, é o chamado movimento Browniano. Robert Brown, em 1827, usando um microscópio observou que partículas de pólen, sobre uma superfície de água, se movimentavam aparentemente de forma aleatória. Como mencionamos, na segunda metade do século XIX a teoria cinética era conhecida e ficou evidente que uma possibilidade para explicar o fenômeno Browniano seria a colisão entre as moléculas do líquido e as partículas suspensas. Outras hipóteses para explicar este fenômeno consistiam em cálculos usando gradientes de temperatura ou incluindo fenômenos de capilaridade. No entanto, os estudos experimentais excluíram todas estas alternativas. No início do século XX diferentes teóricos tentavam explicar o movimento Browniano sobre a base estatística usando a teoria cinético/molecular. Em particular, a teoria de Einstein, a teoria de Smoluchowski e os experimentos de Jean Perrin foram fundamentais. O artigo de Einstein de 1905 sobre o movimento Browniano pode ser resumido no seu resultado para o deslocamento quadrático médio dado pela expressão,

$$\bar{x}^2 = 2Dt = \frac{RT}{3\pi N_A a \eta} t, \quad (2)$$

onde D é o coeficiente de difusão, t o tempo de observação do percurso, R é a constante dos gases ideais, T é a temperatura, a é o raio das partículas, modeladas como esferas e η é o coeficiente de viscosidade do fluido. Um dos principais objetivos de Jean Perrin foi comprovar está fórmula e também determinar um valor, com maior precisão, para a constante de Avogadro N_A . Depois da confirmação da teoria de Einstein por Perrin a teoria atômica da estrutura da matéria foi quase unanimemente aceita na comunidade científica. Esta mudança de mentalidade na comunidade científica pode ser representada pelo primeiro congresso Solvay de 1911, onde se define um novo

programa de pesquisa, focado na teoria do átomo e na quantização da energia.

Por outro lado, explicar a origem da estrutura atômica levou a sérias pesquisas, em particular, as desenvolvidas por Lord Kelvin. A ideia de Kelvin foi inspirada num artigo de Helmholtz [14] de 1858, onde Helmholtz estudou matematicamente a formação de vórtices em fluidos. Kelvin, considerou como fluido o éter e a formação de vórtices neste fluido daria origem aos átomos. Também imaginou que da colisão de dois vórtices se poderia explicar a formação de substâncias compostas. Esta ideia foi o início de um programa para explicar a origem dos átomos.

Contudo, esta teoria avançou pouco pelas dificuldades matemáticas apresentadas, sendo seu maior desenvolvimento um tratado escrito por J.J. Thomson sobre a formação de vórtices. Com este trabalho Thomson ganhou o famoso prêmio Adams. Porém, os experimentos com raios catódicos, mostraram uma nova forma de estudar a estrutura da matéria. O próprio Thomson descobriu o elétron usando esta técnica, o qual ele denominou de corpúsculo de eletricidade negativa. Com esta descoberta Thomson vai transitar do modelo de vórtice para uma teoria atômica focada unicamente nas leis da mecânica e do eletromagnetismo clássicos.

Thomson propôs em 1904 seu famoso modelo de "Pudim de Passas" [15]. Que consistia basicamente em modelar o átomo como uma esfera sólida positiva com cargas elétricas negativas sobre a esfera sólida. Este modelo permitiu que Thomson fizesse previsões matemáticas precisas, como o ângulo de desvio, ou deflexão, de partículas que incidem sobre uma lamina metálica. Os cálculos mostraram que os desvios, nesta teoria, são da ordem de 10^{-4} rad. Estes resultados teóricos não explicaram as grandes deflexões observadas nos experimentos. Outro problema do modelo de Thomson era sua estabilidade eletrostática. O grande mérito da proposta de Thomson foi colocar os estudos do átomo sobre bases precisas nas quais se pudessem fazer previsões e comprovações experimentais. Além disso, este modelo estimulou diretamente o modelo de Rutherford, como veremos a seguir.

Rutherford, ex-aluno de Thomson, desenvolveu uma série de experimentos em colaboração com seus alunos Geiger e Marsden, com os quais comprovaram definitivamente que partículas α podem

ser defletidas em ângulos grandes quando incidentes sobre uma fina folha de ouro.

Este resultado levou Rutherford a propor um novo modelo para a estrutura do átomo em 1911 [16], alternativo ao modelo de Thomson. Rutherford considera que a carga positiva deveria estar concentrada na parte central e os elétrons ficariam em órbitas circulares girando em torno do núcleo. Também para explicar os grandes desvios das partículas α , pelos átomos, era necessário considerar que quase toda a massa deveria estar concentrada no núcleo. Neste contexto, Bohr propõe um novo modelo do átomo que pretende incluir tanto os desenvolvimentos de Rutherford quanto as ideias de quantização de Planck e Einstein.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: na seção II apresentamos de forma resumida o modelo de Bohr, na seção III apresentamos a generalização da teoria de Bohr por Sommerfeld, na seção IV comentamos brevemente aspectos gerais da teoria quântica antiga e na seção V comentamos o famoso trabalho BKS. Na seção VI apresentamos brevemente alguns artigos fundamentais e na seção VII discutimos nossas conclusões.

2 Modelo de Bohr

Um fato experimental bastante importante para o desenvolvimento da teoria do átomo é a descoberta dos seus espectros de linha. No início do século XIX, com as observações iniciais de Wollaston [17] e depois com os trabalhos de Fraunhofer foram estudados os primeiros espectros de linhas da radiação solar. Fraunhofer catalogou muitas linhas escuras de absorção do espectro solar por introduzir redes de difração. Em torno de 1849, Foucault observou que a radiação emitida por um arco voltaico mostrava duas linhas amarelas brilhantes no comprimento de onda correspondente à linha escura catalogada por Fraunhofer como linha *D*. Depois fez passar radiação solar através do arco voltaico e observou que a linha escura *D* era observada com maior intensidade. Foucault interpretou que a fonte luminosa do arco voltaico emitia e absorvia radiação luminosa na mesma frequência. Stokes interpretou isto como um fenômeno de ressonância. Investigações similares e complementares foram apresentadas por Angström, Kelvin, Alter, Plucker,

entre outros [10].

Neste contexto, na segunda metade do século XIX, um avanço significativo foi atingido pelas observações sistemáticas de espectros e pela invenção do espectroscópio por Kirchhoff e Bunsen. Eles interpretaram que as linhas escuras são produzidas pela absorção da radiação luminosa por elementos químicos presentes na atmosfera solar. Ainda observaram que algumas destas linhas são produzidas pela absorção da atmosfera terrestre. As linhas produzidas por nossa atmosfera são denominadas linhas telúricas, que são observadas basicamente no vermelho e são produzidas pelas moléculas de oxigênio de nossa atmosfera. Entre as muitas contribuições de Kirchhoff sobre a espectroscopia se pode mencionar, de forma resumida, as chamadas três leis de Kirchhoff [18]:

- Um sólido, líquido ou gás incandescente sob alta pressão emite um espectro contínuo.
- Um gás quente sob baixa pressão emite um espectro de linhas de emissão.
- Uma fonte contínua de radiação observada através de um gás frio de baixa densidade produz um espectro de linhas de absorção.

Desta forma, a espectroscopia se desenvolveu vigorosamente ao logo da segunda metade do século XIX. Por exemplo, Angström em 1868 publicou o comprimento de onda de 1000 linhas solares de Fraunhofer. Nos anos 1870, Rowland conseguiu produzir redes de difração de alta qualidade com as quais as medidas do espectro solar foram obtidas com maior precisão. Novos elementos foram descobertos usando a técnica da espectroscopia, como o hélio, das observações do espectro solar por Pierre Janssen e independentemente por Norman Lockyer. Outros elementos descobertos usando esta técnica foram o céscio, rubídio, índio, entre outros [19]. A precisão nas medidas espectroscópicas aumentaram ao ponto de usar a linha vermelha do cádmio como base da definição do metro.⁴

Em particular resultou importante o estudo do espectro de linhas do átomo de hidrogênio. Angström identificou as principais linhas espectrais de

emissão: 6562,10 Å, 4860,74 Å, 4340,1 Å e 4101,2 Å. Estudando as primeiras fotografias dos espectros de estrelas, Sir William Huggins identificou várias outras linhas espectrais. Balmer tomou como base as medidas de Angström para obter uma fórmula que ajustava os diferentes dados observacionais:

$$\lambda = b \frac{n^2}{n^2 - 4}, \quad (3)$$

onde n é um número inteiro maior que três, $n \geq 3$, e $b = 3644$ é uma constante. Nesta fórmula o comprimento de onda, λ , é determinado em Å. Depois Rydberg generaliza esta fórmula pela expressão,

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (4)$$

onde R é denominada atualmente como constante de Rydberg. Neste caso m é um inteiro cujo valor determina as diferentes séries das linhas espectrais, a saber, a série de Lyman (ultravioleta), $m = 1$; a série de Balmer (visível), $m = 2$; a série de Paschen (infravermelho), $m = 3$, etc. A outra constante n para cada série começa com o valor $m + 1$. Ritz publica suas pesquisas sobre a combinação de linhas espectrais mostrando que empiricamente se verifica que uma dada linha pode ser obtida pela soma ou diferença de outras duas linhas.

Lorentz no ano de 1892 publica sua influente teoria sobre o elétron [20], e proporciona as ferramentas teóricas necessárias para investigar a origem da emissão das linhas espectrais. Lorentz argumenta que as oscilações destas partículas dentro do átomo dariam origem a campos elétricos e magnéticos e seriam responsáveis da emissão de radiação. Adicionalmente, no ano de 1896, Pieter Zeeman observou um fenômeno fundamental para o desenvolvimento da teoria atômica, hoje conhecido como efeito Zeeman [21]. Este efeito consiste em observar como um campo magnético desdobrar as linhas espectrais emitidas pelos átomos.

Por outro lado, o estudo da radiação térmica levou Max Planck a publicar sua teoria sobre a radiação térmica no início do século XX, onde assumindo a interpretação de Boltzmann para a segunda lei da termodinâmica, concluiu que é necessário introduzir a quantização da energia. Einstein utiliza esta ideia, da quantização

⁴A. Michelson utilizou um interferômetro que construiu para definir o metro em função do comprimento de onda vermelho do cádmio. Sua medida determinou que no ar à pressão de 760 mm e temperatura de 15 °C o metro se define como 1.553.164,13 vezes o comprimento de onda da linha vermelha do cádmio

da energia, para explicar o efeito fotoelétrico por considerar que a propagação da radiação se dá em forma de pacotes de energia.

Neste contexto, alguns cientistas tentam desenvolver modelos sobre o átomo que incluam as novas ideias de quantização da energia e os resultados de Rutherford sobre a estrutura atômica. Algumas destas tentativas foram feitas principalmente por Haas, Schidlof e Hasenöhrle entre os anos 1910 e 1911, mas nenhuma destas propostas teve sucesso. No entanto, uma proposta publicada por N. Bohr no ano de 1913, um físico pouco conhecido na época,⁵ se mostrou um modelo bastante atraente, principalmente, para dar conta de diversos fatos observacionais sobre os espectros do átomo de hidrogênio. Este modelo incluía a hipótese quântica de Planck e a estrutura planetária recentemente proposta por Rutherford de uma forma bastante convincente. Estas características despertaram um forte interesse em diversos cientistas da época.

Em geral, podemos resumir o modelo de Bohr basicamente em duas hipóteses. De acordo com o primeiro artigo seminal de Bohr [22] e com a bela exposição feita por Tomonaga [23] estas duas principais hipóteses podem ser resumidas como:

- O átomo não emite ou absorve energia em forma contínua, e sim em forma discreta com valores característicos para cada átomo. Nos estados permitidos o átomo não emite radiação. Estes estados são conhecidos como estados estacionários.
- A emissão ou absorção de radiação acontece quando o átomo passa de um estado estacionário para outro. Quando isto acontece uma radiação monocromática de frequência dada pela fórmula,

$$\nu = \frac{W_n - W_m}{h}, \quad (5)$$

é emitida ou absorvida dependendo se temos $w_n > w_m$ ou $w_m > w_n$ respectivamente.

Uma das principais razões para o forte interesse no modelo de Bohr, como mencionamos, é sua capacidade para explicar o espectro observado do

⁵Niels Bohr no ano de 1913 não era muito conhecido na física europeia, no entanto, tinha visitado Cambridge e interagido com Thomson e depois em Manchester com Rutherford. Ambos eram prêmios Nobel de física.

átomo de hidrogênio. Por exemplo, a física clássica prediz riscas igualmente espaçadas, no entanto, as observadas são diferentes. Isto é devido basicamente ao mecanismo de emissão ou absorção o qual é diferente do clássico. Considerando a visão clássica a frequência observada no espectro é determinada pela frequência de rotação do elétron na sua órbita. No entanto, no caso de Bohr a frequência do elétron na orbita é diferente da frequência das riscas.

Sejam a o raio da órbita circular do elétron e ω sua velocidade angular, então se aplicamos a terceira lei de Kepler podemos obter,

$$a^3\omega^2 = \frac{Ze^2}{m}, \quad (6)$$

onde Z é o número de carga nuclear. Para este sistema podemos aplicar a conservação da energia de forma que a energia cinética e potencial é constante,

$$\frac{1}{2}ma^2\omega^2 - \frac{Ze^2}{a} = C, \quad (7)$$

onde C é uma constante. Se consideramos estas duas equações podemos obter:

$$C = -\frac{m}{2}a^2\omega^2 = -\frac{Ze^2}{2a} = -\left(\frac{Z^2e^4m\omega^2}{8}\right). \quad (8)$$

Desta equação podemos colocar em evidência a relação [22],

$$\frac{|E|^3}{\omega^2} = \frac{Z^2e^4m}{8}, \quad (9)$$

onde consideramos que $E = C$, isto é, a energia é determinada a menos de uma constante aditiva. Por outro lado, considerando a fórmula de Balmer e Rydberg podemos usar o segundo postulado de Bohr de forma que podemos inferir,

$$hk = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c} = hR \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (10)$$

onde usamos a definição de número de onda e multiplicamos ambos os lados pela constante de Planck. Assim, podemos concluir [22]:

$$E_n = -\frac{hcR}{n^2}. \quad (11)$$

Neste caso convencionamos que nossa escala de energia considera o ponto zero como correspondente a $n \rightarrow \infty$, e consideramos que o termo

$-E_1$ é a energia de ionização do estado fundamental. Podemos observar que desde o estado de menor energia os termos se sucedem de forma que se aproximam cada vez mais uns dos outros tendendo assintoticamente ao limite $E_\infty = 0$. No entanto, a teoria de Bohr deve no limite de $n \gg 1$ se aproximar do resultado clássico, isto é, o que formalmente Bohr denominara em 1923 o princípio de correspondência [24]. No seu primeiro artigo Bohr não menciona diretamente este princípio mais faz uso dele explicitamente assim ele escreve [22]:

"Se N é grande a taxa entre a frequência antes e depois da emissão será muito próxima da unidade; e em concordância com a eletrodinâmica ordinária deveríamos, portanto, esperar que a taxa entre a frequência de radiação e a frequência de revolução também se aproxime da unidade".

Então de acordo com Bohr se consideramos a transição entre duas órbitas vizinhas, mas de números n elevados, se pode mostrar que a frequência emitida pode ser calculada como,

$$\nu \approx \frac{2cR}{n^3}. \tag{12}$$

Assim, podemos usar esta expressão para colocar em evidencia n para substituir na fórmula da energia e obter:

$$E \approx -hcR\left(\frac{\nu}{2cR}\right)^{2/3} = -\left(\frac{cRh^3\omega^2}{16\pi^2}\right)^{1/3}, \tag{13}$$

onde usamos a relação $\omega = 2\pi\nu$ e podemos observar que dessa expressão podemos de novo colocar em evidência a relação

$$\frac{|E|^3}{\omega^2} = \frac{cRh^3}{16\pi^2}. \tag{14}$$

Comparando este resultado com o resultado anteriormente obtido podemos obter uma expressão para a constante de Rydberg como

$$R = R_\infty Z^2 = \left(\frac{2\pi^2 me^4}{h^3 c}\right) Z^2. \tag{15}$$

Desta forma, observando nosso resultado anterior podemos ver que o modelo de Bohr determinou a constante de Rydberg, a qual era conhecida na época, em função da constante de Planck que representa a quantização da energia, da massa e da carga elétrica do elétron e da velocidade da luz. Portanto, substituindo os valores das constantes Bohr no seu artigo obteve um valor de

$R_\infty = 3.1 \times 10^{15} s^{-1}$ que correspondia aproximadamente com o valor determinado usando dados espectroscópicos, $R_\infty = 3.290 \times 10^{15} s^{-1}$.

Bohr em 1913 publica uma trilogia de artigos apresentando sua teoria. Depois da publicação do primeiro artigo da trilogia, Evans, um físico de Manchester que estava trabalhando com espectros de hidrogênio e hélio, publicou um artigo comparando as medidas observacionais com as predições teóricas da teoria de Bohr [25]. Em particular, discutiu as linhas de Pickering as quais eram riscas espectrais observadas nos espectros da estrela Puppis, ζ , e que levou a alguns cientistas da época a pensar que poderiam ser um segundo conjunto de linhas espectrais do hidrogênio, pois podiam ser descritas pela fórmula de Balmer com índices semi-inteiros. Usando a teoria de Bohr se pode mostrar que a frequência resulta [26],

$$\nu = \frac{2\pi^2 me^2 (2e)^2}{h^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \tag{16}$$

a qual corresponde a um átomo de hélio, carga de núcleo $2e$, com um elétron em volta. Especificamente representa um átomo de hélio ionizado. Esta era a melhor alternativa para explicar as riscas de Pickering. No entanto, Alfred Fowler apresentou resultados que mostravam que os cálculos de Bohr não correspondiam com os dados observacionais das linhas de Pickering e com linhas que ele tinha reproduzido no laboratório [27].

Como resposta a esta crítica Bohr refez seus cálculos considerando o efeito da massa finita do núcleo. Resulta fácil estudar este sistema, pois constitui o conhecido problema de dois corpos. Para simplificar o problema podemos considerar que o centro de massa do sistema elétron-núcleo está em repouso obtendo $ma_e = Ma_n$, onde a_n é a distância entre o núcleo e o centro de massa e a_e é a distância entre o centro de massa e o elétron e M é a massa do núcleo. Com estas definições podemos determinar:

$$a_n = \frac{ma_e}{m + M}, \tag{17}$$

$$a_e = \frac{Ma_n}{m + M}. \tag{18}$$

Igualando a força centrípeta com a força de atração de Coulomb obtemos,

$$ma_e \omega^2 = Ma_n \omega^2 = \frac{Ze^2}{a_e + a_n}. \tag{19}$$

Observar que tanto o elétron como o núcleo giram em torno do centro de massa com a mesma frequência angular e que a conservação da energia implica em:

$$\frac{1}{2}M\omega^2 a_n^2 + \frac{1}{2}m\omega^2 a_e^2 - \frac{Ze^2}{a_e + a_n} = E. \quad (20)$$

Usando todas estas equações é possível, de forma análoga ao caso original de Bohr, mostrar que

$$\left(\frac{|E^3|}{\omega^2}\right)^3 = \frac{Z^2 e^4 m}{8(1 + \frac{m}{M})}. \quad (21)$$

Agora de forma similar, a nosso cálculo anterior, podemos considerar estados altamente excitados, onde a diferença de energia entre estados sucessivos resulta pequena comparada com os valores da energia dos próprios estados. Podemos verificar que obtemos de novo o mesmo resultado como no caso anterior. Assim, obtemos uma nova expressão para a constante de Rydberg [28],

$$R_A = \frac{R_\infty Z^2}{1 + \frac{m}{M}}. \quad (22)$$

Portanto, o movimento do núcleo se manifesta numa pequena correção no cálculo da constante de Rydberg. Usando estas fórmulas Bohr escreveu uma carta à revista Nature em outubro de 1913 mostrando que a crítica bem fundada de Fowler poderia ser contestada levando em conta o efeito da massa do núcleo [28]. Fowler tinha argumentado que o cálculo teórico de Bohr dava uma relação $R_{He}/R_H = 4$ e que os resultados experimentais proporcionavam $R_{He}/R_H = 4.0016$. Bohr com seus novos cálculos mostrou que podia obter a seguinte razão $R_{He}/R_H = 4.00163$ que estava em completo acordo com os dados observacionais. Fowler enviou outra carta à revista Nature no mesmo mês concordando com os resultados, porém termina sua carta lembrando que a teoria de Bohr ainda não era capaz de prever as linhas espectrais do hélio normal.

Na figura podemos verificar como o efeito do movimento do núcleo sobre o elétron é notável no caso do hidrogênio e do hélio, como era de esperar, pois são átomos leves. Em contraste para elementos de maior número atômico como o cobre a constante de Rydberg, mesmo incluindo o efeito do núcleo, se aproxima do valor R_∞ da teoria original de Bohr.

Em seu primeiro artigo Bohr também discute o que ele chama de estado estacionário de um átomo e estabelece que o estado é determinado pela quantização do momento angular. Para ver como surge a quantização do momento angular podemos determinar o raio para o n ésimo estado de energia do átomo como,

$$a = -\frac{Ze^2}{2E} = \frac{a_b n^2}{Z}, \quad (23)$$

onde usamos a equação (2) e a equação (3) e a_b representa o raio da primeira órbita circular de Bohr no átomo de hidrogênio,

$$a_b = \frac{h^2}{4\pi^2 m e^2} = 0,528\text{Å}. \quad (24)$$

Também para a velocidade angular podemos obter:

$$\omega = \frac{4\pi R_0 Z^2}{n^3} = \frac{\omega_b Z^2}{n^3}. \quad (25)$$

Usando estes dois resultados podemos determinar uma expressão para o momento angular,

$$L = ma^2\omega = n\frac{h}{2\pi}. \quad (26)$$

Esta fórmula implica que no modelo de Bohr o momento angular está quantizado, de forma que, é igual a um múltiplo de $h/2\pi$. Inclusive podemos assumir o momento angular como um postulado e derivar a fórmula de Balmer. Por exemplo, se usamos uma das expressões da energia e a terceira lei de Kepler, obtemos

$$E = -\frac{Z^2 e^4}{2ma^4\omega^2} = -\frac{Z^2 e^4 m}{L^2} \quad (27)$$

onde $L = ma^2\omega$ como tínhamos derivado. Então se agora substituirmos L pelo seu valor quantizado, obtemos, a expressão anteriormente determinada, para energia

$$E = -\frac{Z^2 e^4 m}{n\frac{h}{2\pi}} = -\frac{hcR_\infty}{n^2}. \quad (28)$$

Por outro lado, Bohr no segundo artigo da trilogia se concentra em átomos multieletrônicos [29]: "Nós assumiremos que os elétrons são arrançados a intervalos angulares iguais em anéis coaxiais girando em torno do núcleo, usaremos as principais hipóteses do primeiro trabalho, isto é, o estado

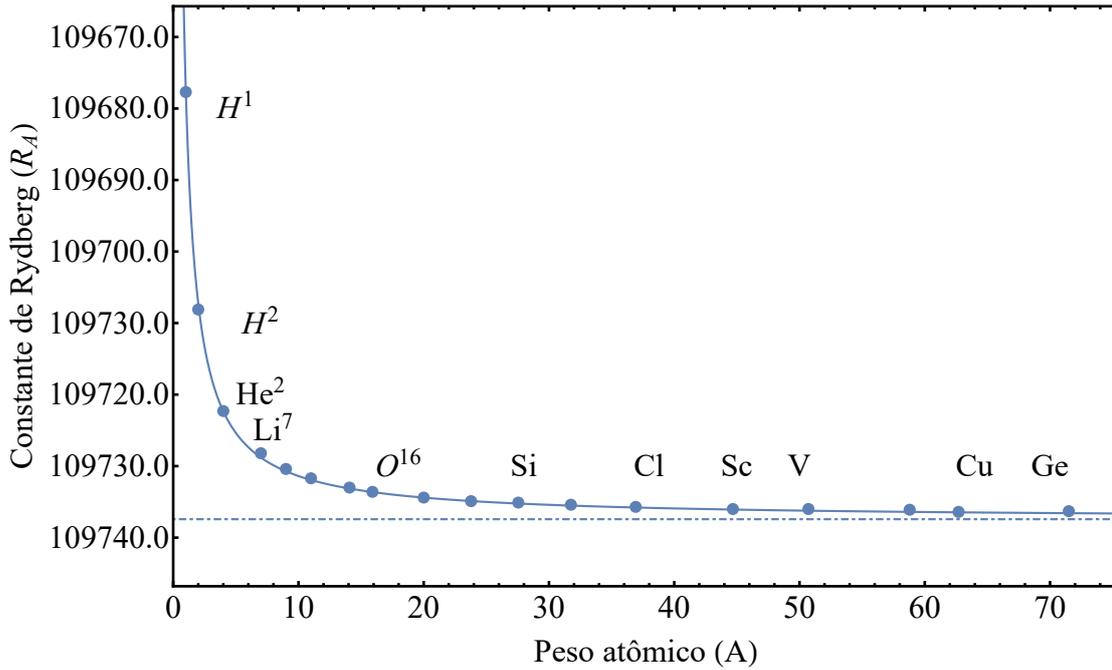


Figura 1: Efeito da massa finita do núcleo no cálculo da constante de Rydberg para diferentes elementos [26].

estacionário de um átomo". Assim, por exemplo, Bohr considera que o átomo do lítio forma uma camada interna com dois elétrons girando em torno do núcleo em posições opostas e o terceiro elétron em outra camada exterior.

Levando em conta estas considerações Bohr assumiu que se F é a carga efetiva (carga do núcleo mais cargas das camadas cheias) então podemos derivar que:

$$\frac{mv^2}{a} = \left(\frac{e}{a}\right)^2 F. \tag{29}$$

Agora seguindo os mesmos passos que foram apresentados anteriormente pode-se derivar que:

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m F e^2}, \tag{30}$$

$$E = -\frac{4\pi^2 m F^2 e^4}{2n^2 h^2}, \tag{31}$$

$$\nu = \frac{4\pi^2 m F^2 e^4}{n^3 h^3}. \tag{32}$$

Uma aplicação, evidente deste método, pode ser feito para o átomo do hélio por igualar a força centrípeta com a força elétron-elétron e elétron-núcleo como,

$$\frac{mv^2}{a} = \frac{Ze^2}{a^2} - \frac{e^2}{(2a)^2}, \tag{33}$$

Esta equação pode ser rearranjada como

$$\frac{mv^2}{a} = \left(Z - \frac{1}{4}\right) \frac{e^2}{a^2}. \tag{34}$$

Comparando esta equação com a equação inicial de F obtemos

$$F = Z - \frac{1}{4}. \tag{35}$$

No caso do átomo de hélio obtemos $F = 1,75$, que comparado com o resultado do método variacional, da física quântica, resulta consistente. A física quântica determina um valor de $F = 2 - 5/16$. Portanto, o uso da teoria de Bohr ainda proporcionava uma boa aproximação.

No terceiro artigo, de sua trilogia, Bohr desenvolveu uma tentativa de teoria de formação de moléculas. Bohr discutiu qualitativamente a formação de moléculas como H_2 , H_2O , O_3 , entre outras [30]. Inicialmente, os dois átomos neutros estão afastados e têm pouca interação. Depois os átomos se aproximam e entra em jogo uma atração entre o elétron, de um dos átomos, e o núcleo do outro átomo. Também resultam forças de repulsão entre os dois elétrons e entre os dois núcleos. Se espera que para uma posição próxima, dos átomos, a força de atração domine com respeito à força de repulsão e desta forma leva, o sistema como um todo, a uma posição de equilíbrio para formar a molécula. Bohr desenvolveu rudimentariamente a teoria matemática deste processo. Para uma simples implementação deste modelo ver o terceiro artigo de Bohr [30] ou o artigo [19].

3 As regras de quantização de Wilson-Ishiwara-Sommerfeld

A teoria de Bohr se desenvolveu notavelmente devido principalmente ao trabalho de Sommerfeld, que coloca a teoria numa nova posição ao propor as chamadas regras de quantização. No entanto, as regras de quantização também foram publicadas independentemente por William Wilson em março de 1915 e por Jun Ishiwara em abril de 1915. O trabalho de Wilson foi publicado no *Philosophical Magazine* com o título: "The quantum theory of radiation and line spectra". Wilson procura uma teoria geral da qual derivar, como casos particulares, tanto a teoria de Planck da radiação térmica, assim como, a teoria do átomo de Bohr. Para isto, Wilson se fundamentou nas seguintes hipóteses:

- As trocas de energia entre os sistemas e o éter, ou entre sistemas, são de caráter descontínuo. Cada sistema conserva a energia e a troca de energia é muito rápida. Durante estas trocas de energia se podem emitir ou absorber quantidades definidas de energia e não arbitrárias ou contínuas.
- Os movimentos de um dado sistema são determinados pela dinâmica hamiltoniana aplicada a sistemas conservativos. Em estas condições resulta conveniente considerar que este sistema representa um estado estacionário.
- Fazendo uso das propriedades matemáticas da energia cinética, isto é, sua dependência quadrática das coordenadas q_s a troca de energia descontínua se produz de tal forma que o movimento estacionário satisfaz:

$$2 \int L_1 dt = \int p_1 dq_1, \quad (36)$$

onde L_1 é o momento angular. Como o lado esquerdo da equação acima é uma constante nada impede de identificar essa constante com o produto nh .

Desta forma, Wilson introduz as regras de quantização. Mas não corresponde a uma derivação formal.

Por outro lado, Jun Ishiwara publica um artigo de título: The universal meaning of the quantum

of action [31], onde procura um significado universal para a constante h . Ishiwara começa mencionando o significado de h , como proposto por Planck, no primeiro congresso de Solvay de 1911. Planck como uma tentativa de entender o significado da constante h define o menor elemento do espaço de fase como

$$\int \int dqdp = h. \quad (37)$$

Planck desenvolveu melhor esta proposta no capítulo 3 de seu livro [32]: "The Theory of Heat Radiation" de 1913.⁶ Adicionalmente, Ishiwara comenta o significado dado por Bohr para a constante h . Como revisamos na seção anterior, para um elétron que está girando numa órbita circular em torno do núcleo o momento angular é constante e igual a $\frac{h}{2\pi}$. Ishiwara tenta unificar estes dois significados dados para h , o quantum de ação. Então, Ishiwara estabelece a seguinte condição quântica [31]: "Na natureza, os movimentos sempre ocorrem de forma que todo plano de fase (p, q) pode ser dividido naquelas regiões elementares de probabilidade cujo valor médio em um ponto definido, do espaço de fase, resulta,⁷

$$h = \frac{1}{j} \sum_{i=1}^j p_i dq_i. \quad (38)$$

Ishiwara não deriva esta equação e considera que ela pode ser usada como a regra de quantização. Porém, nem Wilson nem Ishiwara investigaram detalhadamente as consequências destas condições quânticas para os espectros atômicos. Essa tarefa de aplicação, assim como, de uma proposta conceitual de maior profundidade foi desenvolvida por Sommerfeld. Desde a publicação da trilogia de Bohr em 1913, Sommerfeld ficou interessado na nova abordagem teórica.

Eckert [33] argumenta que a reação de Sommerfeld sobre o trabalho de Bohr pode ser considerada como a primeira reação fora do círculo de Rutherford em Manchester, onde Bohr ficou conhecido por ter pesquisado durante um semestre com Rutherford em 1912. Um aspecto importante para Sommerfeld foi o fato de Bohr ter

⁶A primeira edição desse livro data de 1906, mas devido às múltiplas descobertas experimentais, assim como, teóricas sobre a radiação e a teoria do átomo, Planck organiza uma nova edição.

⁷Originalmente Ishiwara usa uma notação contrária à usual ele coloca p como coordenada de posição e q como coordenada de posição. Aqui usamos a notação convencional.

conseguido derivar a constante de Rydberg como função da constante de Planck. Outra questão na qual estava interessado era o efeito Zeeman.

Numa carta de Sommerfeld [33] a Bohr surge a pergunta sobre a possibilidade de aplicar esta nova abordagem para o efeito Zeeman. Bohr em seu artigo publicado em março de 1914 sob o título: "On the Effect of Electric and Magnetic Fields on Spectral Lines" [34] estuda o efeito Zeeman e encontra dificuldades fundamentais para derivar valores que correspondam aos dados experimentais. Bohr conclui na seção três de seu artigo: "Uma vez que na presença de um campo magnético, o espectro de um elemento não pode ser expresso por uma fórmula do tipo (2), [$\nu = f(n_1) - f(n_2)$], segue-se que o efeito do campo não pode ser explicado por considerações análogas aquelas empregadas na seção 2 ao considerar o efeito de um campo elétrico".

É interessante notar que desde o primeiro congresso de Solvay em 1911, Sommerfeld tentou utilizar a ideia do quantum de ação. Por exemplo, em 1913, ele publicou com Debye um artigo no qual os dois estudam o efeito fotoelétrico usando o quantum de ação [35]. Depois, também em 1913, Sommerfeld publica outro trabalho nos *Annales der Physik* [36], onde estuda a recente descoberta do efeito Paschen-Back. Este efeito tinha sido descoberto em 1912 e basicamente Paschen e seu aluno Back estudaram o efeito Zeeman anômalo em elementos como *H*, *He* e *Li*. Eles observaram que quando aumentavam o campo magnético o efeito se reduzia a um efeito Zeeman normal. Eles descobriram uma transformação magnética. Em geral, estes trabalhos permitem observar que Sommerfeld estava bastante envolvido nas pesquisas de espectros atômicos, assim como, com a proposta de Planck do quantum de ação.

A extensão do modelo de Bohr feita por Sommerfeld teve sua primeira publicação em dezembro de 1915 [37] e depois em janeiro de 1916 [38].⁸ Depois ele publica um artigo de revisão, ainda em 1916 [39] Sommerfeld, resumindo seus resultados. Também em 1919 publica seu livro seminal [40]: "Atombau und Spektrallinien" no qual a teoria é apresentada dentro de uma estrutura maior que podemos chamar de teoria quântica antiga.

Sommerfeld, em artigo de dezembro de 1915 começa escrevendo [37]: "A teoria do espectro de

hidrogênio de Balmer parece, à primeira vista, ter sido completada pelas maravilhosas investigações de N. Bohr. Bohr não só foi capaz de explicar a forma geral da lei para a série, mas também fornecer o valor da constante nela e o refinamento necessário para levar em conta o movimento do núcleo. Pode-se até dizer que a aplicabilidade da teoria de Bohr está, no momento, restrita à série do hidrogênio e às séries do tipo hidrogênio (hélio ionizado, espectros de raios-X, extremos de séries de espectros visíveis). No entanto, gostaria de mostrar que mesmo a teoria da série de Balmer apresenta, em certo sentido, uma deficiência, nomeadamente a partir do momento em que se consideram órbitas que não são circulares (portanto, no caso do átomo de hidrogênio, elípticas). Vou preencher essa lacuna aprofundando o postulado quântico e, assim, iluminar simultaneamente o lugar especial do espectro do hidrogênio". Como se observa, Sommerfeld mostra uma grande admiração pelo trabalho de Bohr e especifica que a teoria do átomo de hidrogênio com órbitas elípticas precisa ainda ser desenvolvida.

Sommerfeld, no seu artigo de 1915, justifica a regra de quantização utilizando a definição de Planck, mencionada anteriormente. Especificamente, Sommerfeld aplica seus argumentos para o caso kepleriano. Ele estabelece a definição:

$$\oint p_n dq = nh. \quad (39)$$

Sommerfeld denomina a esta definição de integral de fase a qual é válida unicamente para movimentos periódicos. Para o problema de Kepler, esta definição, implica nas duas condições:

$$\oint p_\varphi d\varphi = n_\varphi h. \quad (40)$$

$$\oint p_r dr = n_r h, \quad (41)$$

onde a primeira integral corresponde ao ângulo azimutal e a segunda integral à coordenada radial. Assim, em sínteses Sommerfeld determina para o espectro de hidrogênio a fórmula:

$$\nu = N \left(\frac{1}{(n+n')^2} + \frac{1}{(m+m')^2} \right), \quad (42)$$

onde *N* representa a constante de Rydberg e *n* e *m* são números inteiros derivados das regras de quantização. A diferença deste resultado com respeito ao modelo de Bohr é a degenerescência dos

⁸Estes dos artigos tem tradução ao inglês ver as referências

níveis de energia. Por exemplo, a famosa linha H_α que no modelo de Bohr é considerada como produto da transição do átomo da terceira órbita circular para a segunda órbita circular, no caso de Sommerfeld, pode ser considerada como a transição da terceira órbita elíptica, com a condição ($m + m' = 3$), para a segunda órbita elíptica, com a condição ($n + n' = 2$). No mesmo artigo Sommerfeld estuda o problema do átomo de hidrogênio em um campo elétrico e fecha seu artigo estudando um tema que ainda vai ficar como um problema para solucionar, isto é, a independência da escolha de coordenadas das regras de quantização.

No artigo seguinte, de janeiro de 1916, ele estudou os efeitos de um elétron com velocidade relativística. Como resultado desta pesquisa, Sommerfeld conseguiu explicar a estrutura fina do átomo de hidrogênio. No que segue do artigo, Sommerfeld estuda algumas aplicações para átomos multieletrônicos como o hélio carregado positivamente, o lítio e o hélio neutro. Com respeito aos efeitos relativistas sobre a forma da órbita, Sommerfeld, determina que a órbita, neste caso, é dada por uma elipse com precessão. O eixo maior gira em torno do núcleo, no plano da elipse, com velocidade angular constante. A órbita agora é duplamente periódica. Se consideramos que a precessão for pequena, então um período corresponde a órbita da elipse e outro período ao movimento precessional. No seu primeiro artigo de 1916 Sommerfeld utiliza várias aproximações de séries o que faz com que seu resultado proporcione uma fórmula bem diferente da fórmula espectral de seu trabalho anterior. Mas um de seus assistentes Wilhelm Lenz refez o cálculo de forma mais clara e comunicou a Sommerfeld. Este resultado é adicionado por Sommerfeld em seu artigo de revisão de 1916 [39] e é dado por,

$$\nu = \frac{m_0 c^2}{m} \left\{ \left[1 + \frac{\alpha^2}{(n' + \sqrt{n^2 - \alpha^2})^2} \right]^{-1/2} \right. \quad (43)$$

$$\left. - \left[1 + \frac{\alpha^2}{(m' + \sqrt{m^2 - \alpha^2})^2} \right]^{-1/2} \right\}, \quad (44)$$

onde $\alpha = \frac{2\pi e^2}{hc}$ é denominada de constante de estrutura fina. Se $\alpha \rightarrow 0$ a fórmula anterior se reduz à fórmula determinada por Bohr. Portanto, o efeito relativista fica bastante evidente escrito desta forma.

4 Outros desenvolvimentos e o princípio de correspondência

Um aspecto importante dos trabalhos de Sommerfeld resulta ser a dependência das regras de quantização com respeito das coordenadas. Neste ponto as contribuições de Epstein [41] e Schwarzschild [42] são fundamentais. Ambos, de forma independente, chegaram a resultados análogos. Para investigar este problema eles utilizaram a teoria de Hamilton-Jacobi da mecânica clássica. Esta teoria permitiu entender as condições para aplicar adequadamente as regras de quantização: a primeira condição consiste em que para um dado sistema o número de graus de liberdade deve ser finito e a segunda condição que a equação de Hamilton-Jacobi deve ser separável.

De forma resumida podemos considerar que temos um sistema mecânico de coordenadas $q_1, q_2, q_3, \dots, q_r$ e momentos $p_1, p_2, p_3, \dots, p_r$. Agora se fazemos uma transformação canônica onde todas as variáveis sejam constantes de movimento. A função geratriz, S , desta transformação resultada na equação de Hamilton-Jacobi,

$$H \left(q_1, \dots, q_r, \frac{\partial S}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial q_r} \right) + \frac{\partial S}{\partial t} = 0. \quad (45)$$

Se não existe dependência do tempo podemos escrever,

$$S(q_i, \alpha_i, t) = W(q_i, \alpha_i) - \alpha_1 t, \quad (46)$$

onde α_1 representa a energia e os outros α_i são constantes de movimento independentes. Pode-se substituir essa expressão na equação geral para obter a equação de Hamilton-Jacobi independente do tempo,

$$H \left(q_i, \frac{\partial W}{\partial q_i} \right) = \alpha_1 \quad (47)$$

A utilidade do formalismo de Hamilton-Jacobi, neste caso, resulta da separação de variáveis, pois quando um Hamiltoniano é separável facilita encontrar a solução do sistema mecânico. Um sistema será totalmente separável se a função S pode ser escrita como um somatório,

$$S = \sum_i S_i(q_i; \alpha_1, \dots, \alpha_n; t). \quad (48)$$

Isto corresponde a termos n equações de Hamilton-Jacobi e pode-se mostrar que no caso de um número finito de graus de liberdade do

sistema o movimento resulta acotado e multiperíodico. Matematicamente isto significa que cada p_i é função unicamente de seu q_i ,

$$p_i = p_i(q_i). \quad (49)$$

Considerando estes resultados Epstein e Schwarzschild concluíram que somente no caso onde o sistema físico tem um sistema de coordenadas com separação de variáveis se pode aplicar as regras de quantização. No entanto, pode haver sistemas físicos nos quais a equação de Hamilton-Jacobi seja separável em mais de um sistema de coordenadas. Neste caso, se diz que se trata de um sistema degenerado. Para caracterizar estes sistemas se pode aplicar a relação dada por,

$$\sum m_i \nu_i = 0, \quad (50)$$

onde m_i são números inteiros e ν_i são as frequências características do sistema. Uma forma de quebrar a degenerescência é considerar um efeito adicional sobre o sistema. Por exemplo, desde o ponto de vista físico seria incluir efeitos relativistas ou aplicar um campo elétrico.

Schwarzschild [42] considerou um método ainda mais eficiente que pode ser aplicado no caso de termos um sistema multiperíodico. Este método, importado de problemas astronômicos, é denominado de "variáveis de ângulo e ação". Neste formalismo a variável de ação se calcula como:

$$J_i = \oint p_i dq_i, \quad (51)$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots, n$. E a variável de ângulo se determina como:

$$\omega_i = \frac{\partial W}{\partial J_i}. \quad (52)$$

Assim, a função característica que transforma as variáveis (q_i, p_i) para (ω, J) pode ser escrita como

$$W = \sum W_i(q_i, J_1, \dots, J_l). \quad (53)$$

Com esta transformação de variáveis o Hamiltoniano resulta ser unicamente função da ação:

$$H = H(J_1, \dots, J_l). \quad (54)$$

Neste caso, a integração das equações de movimento resulta ser:

$$\omega_i = \nu_i t + \beta_i. \quad (55)$$

Segundo a proposta de Schwarzschild as regras de quantização se aplicam para as variáveis de ação da forma

$$J_i = n_i h \quad (56)$$

Outro desenvolvimento teórico fundamental para a teoria de Bohr, e em geral para a teoria quântica antiga, são os artigos de Ehrenfest sobre a hipótese adiabática. Em particular seu artigo de 1916 [43], onde demonstra que as condições de Sommerfeld representam invariantes adiabáticos para o sistema. Se um dado sistema físico realiza um processo lento o suficiente para que uma grandeza permaneça constante ao longo do processo, então podemos dizer que esta grandeza representa um invariante adiabático.

Burgers, um aluno de Ehrenfest, em 1917 demonstra que as variáveis de ação J são invariantes adiabáticos [44]. Portanto, para encontrar os estados estacionários devemos encontrar certas grandezas J as quais variam muito lentamente. De esta forma a teoria de Bohr proporcionar à teoria quântica antiga sua melhor formulação conceitual possível.

Bohr foi consciente da importância da hipótese adiabática. Isto ficou evidente em seu artigo de 1918 [45] onde, entre outras coisas, destaca os trabalhos de Ehrenfest e denomina a teoria dos invariantes adiabáticos como teoria da transformabilidade. Outro aspecto importante, deste artigo de 1918, é sua revisão da teoria da radiação quântica de Einstein de 1917. Neste artigo Einstein propôs conceitos fundamentais como a emissão espontânea e deriva a condição da frequência de Bohr de considerações puramente estatísticas. Influenciado por este artigo Bohr considera que a transição entre estados estacionários deve ser estudado com base a considerações probabilísticas.

Também no artigo de Bohr de 1918 é destacável o uso do princípio de correspondência para justificar o uso do eletromagnetismo clássico na descrição dos processos atômicos. O princípio de correspondência para Bohr tinha um caráter fundamental, incluso em um artigo de 1923 [24], considera que este princípio de correspondência deve ser considerado como uma lei quântica.

Todos estes desenvolvimentos permitem construir o que se denominou de teoria quântica antiga e, em forma resumida, está fundamentada nas seguintes ideias:

- Dado um sistema físico construímos usando o

formalismo Hamiltoniano as equações de movimento e determinamos as trajetória contínuas permitidas.

- Usamos as regras de quantização para selecionar as trajetórias clássicas que são permitidas por estas regras.
- Usamos os resultados para determinar as transição permitidas entre estados estacionários.

No entanto, um aspecto difícil de ser considerado na teoria de Bohr foi o estudo das intensidades das linhas espectrais. Bohr considerou que encontrar uma forma de utilizar a teoria eletromagnética nos processos atômicos, via o princípio de correspondência, seria fundamental para determinar estas intensidades.

5 *Kramers e a teoria BKS (Bohr-Kramers-Slater)*

As contribuições de Kramers na teoria quântica antiga foram fundamentais para atingir seus limites e poder formular a moderna mecânica quântica. Kramers começou a trabalhar no grupo de Bohr em Copenhague desde 1916. Bohr sugeriu como tema de tese estudar a polarização e as intensidades das linhas espectrais dos átomos. Especificamente, Kramers se concentrou em determinar as características dos espectros para o átomo de hidrogênio e também no caso da interação com um campo elétrico. Ele, em sua tese, desenvolveu com maior detalhe a teoria de sistemas múltiplos periódicos em conexão com a teoria de Hamilton-Jacobi e aplicou a separação de variáveis para o átomo de hidrogênio relativista. Este trabalho colocou Kramers como um dos melhores teóricos da teoria quântica da época.

A teoria de Bohr funcionava muito bem para o átomo de hidrogênio, mas para átomos multieletrônicos não funcionava adequadamente. Assim, o seguinte problema a ser estudado por Kramers foi o átomo de hélio, isto é, o átomo multieletrônico mais simples depois do hidrogênio. Em um interessante trabalho de 1923 Kramers [46] fez um estudo bastante engenhoso do átomo de hélio. Kramers notou que todas as tentativas de estudar o átomo de hélio, no seu estado fundamental, considerando os dois elétrons se movimentando no mesmo plano não funcionavam. Então, ele

propôs que os elétrons deveriam se movimentar em planos diferentes formando um ângulo entre eles. Este ângulo era determinado pela condição que o momento angular total do átomo seja constante e igual a \hbar . A diferença de fases entre os elétrons foi escolhida de forma a minimizar a energia média de interação entre os dois elétrons. Com estas condições Kramers consegue dividir o Hamiltoniano em duas partes. Para a primeira parte do Hamiltoniano, Kramers mostrou que podia usar a separação de variáveis e as regras de quantização. Para a segunda parte, Kramers observou que era pequena o suficiente para utilizar a teoria de perturbações. Desta forma, Kramers consegue solucionar o problema do hélio, dentro do formalismo da antiga teoria quântica.

No entanto, as estimativas da teoria de Kramers não se ajustavam aos dados disponíveis. Adicionalmente, ele mostrou que a solução encontrada, para o estado fundamental, era instável. Como consequência, Kramers concluiu que para sistemas multieletrônicos a mecânica clássica não funcionava adequadamente.

De alguma forma estes resultados contribuíram para dar as condições adequadas para a procura de uma nova teoria. Um ponto ainda mais fundamental foram os estudos de Kramers sobre dispersão, cujos resultados ainda são importantes atualmente, e também mostraram uma vez mais os limites da teoria de Bohr.

Neste contexto, em torno de 1923 Bohr parecia consciente que o problema da dispersão de ondas eletromagnéticas por átomos poderia sobrepassar sua teoria. A questão fundamental para Bohr era como conciliar uma descrição descontínua dos processos atômicos com uma descrição contínua do eletromagnetismo clássico [24]. Em consequência, Bohr observou que o eletromagnetismo clássico ao ser construído com processos contínuos está fortemente associado com as leis de conservação, as quais são ligadas com uma descrição contínua do espaço-tempo. Como os processos atômicos são essencialmente descontínuos Bohr pensou que as leis de conservação não deveriam limitar uma dada teoria. Portanto, Bohr começa a considerar a possibilidade de uma descrição quântica do átomo não necessariamente limitada pelas leis de conservação.

Neste contexto, Slater publica um artigo na Nature em 1924 [47] onde faz uma proposta radical. Considerou que um átomo em um estado es-

tacionário está composto por um número grande de osciladores virtuais os quais vibram em todas as frequências possíveis para o átomo. Este átomo pode emitir um pacote de energia. Quando este pacote de energia interage com outro átomo, que também tem um conjunto grande de osciladores virtuais, pode ser provável que este átomo absorva o pacote de energia e, o átomo, possa ser excitado a um estado de maior energia. Este conjunto de osciladores virtuais resultam ser responsáveis da criação de um campo virtual o qual contém as frequências quânticas de transição.

Slater considerou que a interação entre átomos é feita por campos virtuais. Desde seu ponto de vista, este mecanismo reconciliaria a ideia de fóton com a natureza contínua do eletromagnetismo clássico. Em sua teoria, Slater utilizou os conceitos de probabilidade, dados por Einstein, com o objetivo de determinar as frequências de transição.

Slater em 1924 visitou Copenhague e Bohr se entusiasmou com sua proposta e, em conjunto com Kramers, discute e publica um artigo, onde é proposta a teoria *BKS*. Mas Bohr e Kramers não gostavam do conceito de fóton. Por isso, diferentemente de Slater, Bohr e Kramers usaram a ideia de osciladores virtuais para tentar dispensar o uso do fóton. Também reinterpretaram a proposta probabilística original de Slater por considerar que as leis de conservação da energia e do momento não se conservam localmente, mas estatisticamente. Eles usaram esta teoria para reinterpretar o experimento de Compton.

Esta teoria encontrou rapidamente oposição de muitos cientistas influentes como Arnold Sommerfeld, Albert Einstein, Compton e Wolfgang Pauli, e ainda é incerto se o próprio Kramers apoiava esta teoria. Por outro lado, Bothe e Geiger [48] em Berlim apresentam resultados de seus experimentos mostrando que a teoria *BKS* não corresponde com seus resultados. Independentemente o próprio Compton e Simon [49] apresentaram resultados similares. Portanto, a teoria *BKS* foi desconsiderada.

No entanto, como observa Miller [50] talvez a melhor contribuição desta teoria foi a influência metodológica sobre Heisenberg, quem percebeu que a teoria *BKS* foi uma espécie de teoria intermediária da realidade. Esta nova teoria, uma vez mais, reforçava a ideia que a teoria de Bohr deveria ser substituída por uma teoria mais abran-

gente.

6 Alguns artigos fundamentais

Nesta seção vamos mencionar brevemente três artigos fundamentais, publicados entre 1924-1925, que prepararam a chegada da mecânica quântica com o trabalho seminal de Heisenberg. A escolha destes artigos é incompleta. Mas são úteis para termos uma ideia da atmosfera intelectual da época. Dois destes artigos são diretamente mencionados por Heisenberg em seu artigo de criação da mecânica quântica de 1925 e o outro é devido a Pauli.

6.1 Uber Quantenmechanik [51]

Max Born foi o grande arquiteto das contribuições de Gottingen para a mecânica quântica. Como mencionamos a teoria de Bohr funcionava muito bem para átomos com um elétron, mas para átomos polieletrônicos não funcionava. Max Born usou como estratégia adaptar o método de perturbações clássicas da astronomia para sistemas atômicos. Como sistema atômico foi assumido o átomo de hélio, o sistema mais simples depois do hidrogênio. Este problema foi investigado inicialmente em um artigo em colaboração com Pauli [52] e depois em outros dois artigos em colaboração com Heisenberg [53, 54]. Em todos estes artigos os resultados determinados não correspondiam com os dados observacionais. Born comenta que estes e outros resultados indicavam que uma nova mecânica, com mudanças radicais, deveria ser formulada.

No artigo "Uber Quantenmechanik", que tem como único autor Max Born, apresenta-se formalmente a teoria dos movimentos periódicos múltiplos introduzindo as técnicas de perturbações e incluindo a ideia de osciladores virtuais. Porém, considerando que a energia e momento se conservam. Neste artigo é mencionada pela primeira vez a expressão: mecânica quântica (Quantenmechanik). No artigo Born agradece a Heisenberg por desenvolver muitos dos cálculos apresentados. Este artigo é diretamente citado por Heisenberg, no seu artigo seminal que inaugura a mecânica quântica, como sendo um dos artigos mais importantes que influenciou seu pensamento.

6.2 *Über die Streuung von Strahlung durch Atome* [55]

A teoria clássica da dispersão foi desenvolvida principalmente por Drude [56] e uma teoria análoga para os processos atômicos foi apresentada inicialmente por Ladenburg [57]. No entanto, foi Kramers em dois pequenas notas na revista *Nature*, em 1924, quem determinou a fórmula da dispersão, sob o princípio de correspondência, incluindo processos de emissão e absorção [45].

No entanto, é neste artigo [55], feito em colaboração com Heisenberg, que Kramers apresenta uma derivação de sua teoria da dispersão de forma sistemática. Este artigo também é citado diretamente por Heisenberg no seu seminal artigo. Heisenberg considera que este artigo representa o maior desenvolvimento da teoria de Bohr quando aplicada para estudar processos de dispersão atômicos.

Um aspecto importante da fórmula da dispersão de Kramers é que ela depende unicamente da transição entre dois estados estacionários, mas não das grandezas dos próprios estados estacionários. Isto é, a fórmula de dispersão não depende dos elementos da órbita como em mecânica clássica. Neste artigo se observa essa característica e deve ter influenciado em Heisenberg para procurar, como ele mesmo escreve no seu artigo seminal, uma reinterpretação do referencial teórico sobre o qual construir a nova mecânica. Este referencial não deve incluir elementos orbitais diretamente e sim grandezas observáveis como frequências, intensidades, polarização, etc.

6.3 *Princípio de exclusão de Pauli* [58]

Paralelamente aos trabalhos feitos em Copenhague (Bohr e Kramers) e Gottingen (Born e Heisenberg), em Hamburgo Pauli desenvolveu alguns conceitos inovadores. Pauli tinha desenvolvido sua tese de doutorado entre 1919 e 1921 sobre a molécula do íon de hidrogênio. Este tema foi sugerido pelo seu orientador Sommerfeld. Usando a mecânica quântica antiga Pauli mostrou que a molécula do íon de hidrogênio era instável. Portanto, a teoria de Bohr era incompatível com os resultados experimentais.

Pauli investiga também o efeito Zeeman anômalo em metais alcalinos e com isto a estrutura eletrônica dos elementos da tabela periódica [59]. Em particular, não havia uma base teórica para

a longitude dos períodos dos elementos da tabela periódica (2, 8, 18, 32, ...). Depois da publicação de um artigo por Stoner [60] Pauli reconhece que os números quânticos de um elétron devem ser n , l , $j = l \pm 1/2$ e m_j . Por n e l Pauli denotou os números quânticos principal e angular respectivamente. Por j o momento angular total e por m_j sua projeção, em notação moderna. Assim, quando $l = 0$ o momento angular total do elétron é dado por $j = \pm 1/2$. Com base nisto Pauli propôs seu princípio de exclusão: em um átomo dois elétrons não podem ter os quatro números quânticos iguais.

Pauli, verificou que sua proposta correspondia com resultados empíricos. Mas ele não deu nenhuma interpretação teórica porque pensava que este novo número quântico era uma propriedade característica da nova mecânica. Então, para os números quânticos (n, l, j, m_j) Pauli obteve $2(2l + 1)$ possibilidades. Assim, ele determinou a longitude correta dos períodos (2, 8, 18, 32, ...) como pode ser facilmente verificado. Estes resultados são publicados em dois artigos [61] e [58]. Esta nova propriedade atualmente é conhecida como spin do elétron e seu princípio de exclusão é fundamental para explicar a estrutura da tabela periódica e em geral a estabilidade da matéria.

Mas o fundamental para nossa discussão é mostrar que Pauli com suas investigações leva a teoria de Bohr até seus limites e, desta forma, contribuiu decisivamente com resultados que mostraram a necessidade de uma nova mecânica.

7 *Conclusões*

Neste artigo revisamos o modelo de Bohr e como o árduo trabalho de muitos cientistas, dentro deste referencial teórico, permitiu abrir espaço para uma nova teoria da natureza, a mecânica quântica. Com isto queremos mostrar que uma nova teoria não resulta instantaneamente sem nenhuma conexão com as teorias anteriores. As novas teorias, em alguns casos, têm diferenças notáveis com respeito das antigas teorias. No entanto, as peças para construir estas diferenças são encontradas nas teorias anteriores. Isto pode ser visto na relação entre a teoria de Bohr e a moderna mecânica quântica.

Pauli, em Hamburgo, chega a um resultado fundamental, um resultado próprio da mecânica quântica moderna, seu princípio de exclusão. A

grande intuição de Pauli ao se movimentar nos meandros dos resultados observacionais da época, assim como, seu conhecimento das limitações teóricas da teoria de Bohr, permitiram que ele insistisse na necessidade de um novo grau de liberdade para o elétron, o spin.

Por outro lado, o trabalho de Heisenberg dentro da teoria de Bohr, especialmente, dentro do formalismo para determinar as intensidades de riscas espectrais e seus estudos dos processos de dispersão da interação entre átomos e radiação, foram fundamentais, como treinamento teórico para desenvolver a mecânica quântica. Neste sentido, é fundamental a teoria *BKS* como inspiradora para a necessidade de uma nova teoria.

Em síntese, esperamos que este artigo possa contribuir para o entendimento da importância da teoria de Bohr na formulação da mecânica quântica, assim como, esperamos que sirva de complemento a uma disciplina de física moderna ou de introdução à mecânica quântica.

Agradecimentos

A.M.V.T. Gostaria de agradecer à UFES por permitir coordenar um projeto da Pró-reitoria de Extensão sobre história da ciência. Este artigo foi iniciado dentro deste programa.

Sobre o autor

Alan M. Velásquez-Toribio (alan.toribio@ufes.br) possui Graduação em Física pela Universidad Nacional de Trujillo (Perú) e Doutorado em Física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Atualmente é professor da Universidade Federal do Espírito Santo e trabalha, principalmente, com pesquisas na área de cosmologia teórica. Também desenvolve trabalhos sobre história e filosofia da ciência.

Referências

- [1] Aristotle, *Fisica* (Bompiani, Milano, 2011).
- [2] Epicuro, *Epicuro, Cartas e Princípios* (Mon-tecristo Editora, 2019).
- [3] T. Carus, *The way things are: the De re-rum natura of Titus Lucretius Carus* (Indiana University Press, Bloomington, 1969).
- [4] D. Marcondes, *A filosofia árabe: um encontro entre Ocidente e Oriente*, Expresso Zahar (Zahar, 2016).
- [5] T. R. Rovaris, *O projeto epicurista anti-aristotélico de pierre gassendi*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia (2007). Disponível em <http://www.repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/11223>, acesso em dez. 2021.
- [6] L. Zaterka, *Robert Boyle e a química experimental - O ensaio do nitro: alguns aspectos relacionados à polêmica com espínosa*, Cadernos de História e Filosofia da Ciência **11**(1), 63 (2001).
- [7] R. F. de Farias e L. S. das Neves, *História da Química: Um Livro-Texto Para a Graduação* (Editora Átomo, 2011), 2 ed.
- [8] I. Newton, *Principia - Princípios Matemáticos de Filosofia Natural*, vol. 1 (Editora Folha de São Paulo, 2010).
- [9] F. Greenaway, *John Dalton and the Atom* (Cornell University Press, Nova York, 1966).
- [10] P. de La Catardiére, *História das Ciências - Da Antiguidade aos Nossos Dias*, vol. 1 e 2 (Texto & Grafia, 2010).
- [11] S. R. Dahmen, *A obra de Boltzmann em física*, Revista Brasileira de Ensino de Física **28**(3), 281 (2006).
- [12] J. C. Maxwell, *V. Illustrations of the dynamical theory of gases - Part I. On the motions and collisions of perfectly elastic spheres*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **19**(124), 19 (1860).
- [13] J. C. Maxwell, *II. Illustrations of the dynamical theory of gases*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **20**(130), 21 (1860).
- [14] H. Helmholtz, *Über integrale der hydrodynamischen gleichungen, welche den wirbelbewegungen entsprechen*, *Journal für die reine und angewandte Mathematik* **1858**(55), 25 (1858).

- [15] J. J. Thomson, *XXIV. On the structure of the atom: an investigation of the stability and periods of oscillation of a number of corpuscles arranged at equal intervals around the circumference of a circle; with application of the results to the theory of atomic structure*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **7**(39), 237 (1904).
- [16] E. Rutherford, *LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **21**(125), 669 (1911).
- [17] W. H. Wollaston, *XII. A method of examining refractive and dispersive powers, by prismatic reflection*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* **92**, 365 (1802).
- [18] T. Hockey (ed.), *The biographical encyclopedia of astronomers* (Springer, New York, 2007).
- [19] C. Filgueiras, J. Braga e N. H. T. Lemes, *O centenário da molécula de Bohr*, *Química Nova* **36**(7), 1078 (2013).
- [20] H. A. Lorentz, *La théorie électromagnétique de Maxwell et son application aux corps mouvants / par H.A. Lorentz*. (E.J. Brill, Leide, 1892).
- [21] O. J. Lodge, *The influence of a magnetic field on radiation frequency*, *Proceedings of the Royal Society of London* **60**(359-367), 513 (1897).
- [22] N. Bohr, *I. On the constitution of atoms and molecules*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **26**(151), 1 (1913).
- [23] S. I. Tomonaga, *Quantum Mechanics vol. 1 - Old Quantum Theory* (North-Holland, Amsterdam, 1962).
- [24] N. Bohr, *Über die anwendung der quantentheorie auf den atombau*, *Zeitschrift für Physik* **13**(1), 117 (1923).
- [25] E. J. Evans, *The spectra of Helium and Hydrogen*, *Nature* **92**(2288), 5 (1913).
- [26] H. E. White, *Introduction to Atomic Spectra* (McGraw-Hill, New York, 1934).
- [27] A. Fowler, *The spectra of helium and hydrogen*, *Nature* **92**(2295), 232 (1913).
- [28] N. Bohr, *The spectra of helium and hydrogen*, *Nature* **92**(2295), 231 (1913).
- [29] N. Bohr, *XXXVII. On the constitution of atoms and molecules*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **26**(153), 476 (1913).
- [30] N. Bohr, *Sobre a constituição de átomos e moléculas*, vol. II de *Textos Fundamentais da Física Moderna* (Fundação Calouste Gulbenkian, 1979).
- [31] J. Ishiwara, *The universal meaning of the quantum of action*, *The European Physical Journal H* **42**(4), 523 (2017).
- [32] M. Planck, *The Theory of Heat Radiation* (Dover Publications, 1991).
- [33] M. Eckert, *How Sommerfeld extended Bohr's model of the atom (1913-1916)*, *Eur. Phys. J. H* **39**(2), 141 (2014).
- [34] N. Bohr, *LIX. On the effect of electric and magnetic fields on spectral lines*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **27**(159), 506 (1914).
- [35] P. Debye e A. Sommerfeld, *Theorie des lichtelektrischen effektes vom standpunkt des wirkungsquantums*, *Annalen der Physik* **346**(10), 873 (1913).
- [36] A. Sommerfeld, *Der zeemaneffekt eines anisotrop gebundenen elektrons und die beobachtungen von paschen-back*, *Annalen der Physik* **345**(4), 748 (1913).
- [37] A. Sommerfeld, *On the theory of the Balmer series - presented at the meeting on 6 december 1915*, *Eur. Phys. J. H* **39**(2), 157 (2014).
- [38] A. Sommerfeld, *The fine structure of Hydrogen and Hydrogen-like lines - presented at the meeting on 8 january 1916*, *Eur. Phys. J. H* **39**(2), 179 (2014).

- [39] A. Sommerfeld, *Zur quantentheorie der spektrallinien*, *Annalen der Physik* **356**(18), 125 (1916).
- [40] A. Sommerfeld, *Atombau Und Spektrallinien* (Nabu Press, 2010).
- [41] P. S. Epstein, *Zur theorie des starkeffektes*, *Annalen der Physik* **355**(13), 489 (1916).
- [42] K. Schwarzschild, *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin* 189 (1916).
- [43] P. Ehrenfest, *Adiabatische invarianten und quantentheorie*, *Annalen der Physik* **356**(19), 327 (1916).
- [44] J. M. Burgers, *Adiabatic invariants of mechanical systems. i.*, *Proceedings of the Amsterdam Academy* **20**, 149 (1917).
- [45] B. L. van der Waerden, *Sources of quantum mechanics* (Dover Publications, Nova York, 1968).
- [46] H. A. Kramers, *Über das modell des heliumatoms*, *Zeitschrift für Physik* **13**(1), 312 (1923).
- [47] J. C. Slater, *Radiation and atoms*, *Nature* **113**(2835), 307 (1924).
- [48] W. Bothe e H. Geiger, *Über das wesen des compton-effekts; ein experimenteller beitrag zur theorie der strahlung*, *Zeitschrift für Physik* **32**(1), 639 (1925).
- [49] A. H. Compton e A. W. Simon, *Directed quanta of scattered x-rays*, *Phys. Rev.* **26**, 289 (1925).
- [50] A. I. Miller, *Early Quantum Electrodynamics: A Source Book* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [51] M. Born, *Über quantenmechanik*, *Zeitschrift für Physik* **26**(1), 379 (1924).
- [52] M. Born e W. Pauli, *Über die quantelung gestörter mechanischer systeme*, *Zeitschrift für Physik* **10**(1), 137 (1922).
- [53] M. Born e W. Heisenberg, *Über phasenbeziehungen bei den bohrschen modellen von atomen und molekeln*, *Zeitschrift für Physik* **14**(1), 44 (1923).
- [54] M. Born e W. Heisenberg, *Die elektronenbahnen im angeregten heliumatom*, *Zeitschrift für Physik* **16**(1), 229 (1923).
- [55] H. A. Kramers e W. Heisenberg, *Über die streuung von strahlung durch atome*, *Zeitschrift für Physik* **31**(1), 681 (1925).
- [56] P. Drude, *Zur geschichte der elektromagnetischen dispersionsgleichungen*, *Annalen der Physik* **306**(2), 437 (1900).
- [57] R. Ladenburg, *Die quantentheoretische deutung der zahl der dispersionselektronen*, *Zeitschrift für Physik* **4**(4), 451 (1921).
- [58] W. Pauli, *Über den zusammenhang des abschlusses der elektronengruppen im atom mit der komplexstruktur der spektren*, *Zeitschrift für Physik* **31**(1), 765 (1925).
- [59] M. Born, *Física Atômica* (Fundação Calouste Gulbenkian, 1965).
- [60] E. C. Stoner, *LXXIII. The distribution of electrons among atomic levels*, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* **48**(286), 719 (1924).
- [61] W. Pauli, *Über den einfluß der geschwindigkeitsabhängigkeit der elektronenmasse auf den zeemaneffekt*, *Zeitschrift für Physik* **31**(1), 373 (1925).

As Astrocientistas e o paradoxo da desigualdade de gênero na física

Carla R. Almeida¹, Paola C. M. Delgado² e Tays Miranda^{3,4}

¹Universidade de São Paulo

²Jagiellonian University, Polônia

³Universidade de Jyväskylä, Finlândia

⁴Universidade de Helsinki, Finlândia

Resumo

Em fevereiro de 2021 ocorreu a primeira edição do evento *As Astrocientistas: Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação*, que reuniu grandes nomes da ciência brasileira para homenagear as pesquisadoras brasileiras ou estrangeiras que tenham vínculos com o nosso país, em celebração ao dia internacional das mulheres e meninas na ciência. Neste artigo, apresentamos nossa motivação para organizar este evento, assim como as dificuldades que enfrentamos e os aprendizados que conquistamos. Também expomos nossa interpretação sobre a relevância deste encontro.

Abstract

The first edition of the event *As Astrocientistas: the Brazilian Meeting of Women and Girls in Astrophysics, Cosmology, and Gravitation*, happened in February 2021. It gathered great names of Brazilian science to pay homage to Brazilian female researchers and other female physicists with close ties to our community. This paper presents our motivation to organize this event, the challenges we faced, and exposes the learning experience we gained from doing so. We will talk about the relevance of this event as we perceive it.

Palavras-chave: As Astrocientistas, mulheres na ciência, discussão de gênero

Keywords: As Astrocientistas, women in science, gender equality

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37327](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37327)

1 Introdução

A baixa representação de mulheres na ciência é paradoxal. Os conceitos que movem a prática científica, falseabilidade e reprodutibilidade, são atividades dinâmicas que exigem a colaboração de uma comunidade especializada para acontecer. O sucesso de uma teoria depende dela ser testada e questionada de diversos ângulos, com uma variedade de pensamentos que apenas um ambiente diversificado pode oferecer. Ainda assim, continua sendo comum observarmos grupos inteiros de pessoas tendo suas contribuições apagadas ou desvalorizadas simplesmente por serem diferentes do padrão dominante.

Felizmente, a questão de gênero vem ganhando espaço para debates nas últimas décadas, apesar dos obstáculos. Pesquisas sobre a participação e atuação por gênero alcançaram maior notoriedade há menos de vinte anos e são essenciais para

entender e dar dimensão ao problema. Estes são os primeiros passos em busca de soluções. Porém, tais pesquisas não são devidamente valorizadas por uma parcela da comunidade científica. Em muitos casos, são literalmente desencorajadas. Essa oposição é apenas um dos fatores que dificultam a coleta de dados, em especial em países com uma maior resistência em discutir questões de gênero.

No Brasil de 2020, um país assolado por uma crise política, econômica, social e da saúde, onde a ocorrência de ataques contra grupos não-dominantes e a desvalorização da ciência se tornaram mais evidentes, nós, jovens pesquisadoras brasileiras, decidimos transformar a ansiedade para com o nosso próprio futuro em algo positivo. Assim nasceu a ideia para o evento *As Astrocientistas*, uma celebração das talentosas cientistas brasileiras, ou com vínculos fortes com o nosso país, que pesquisam nas áreas de astrofísica, cos-

mologia e gravitação.

A primeira edição do evento aconteceu em formato virtual em fevereiro de 2021, mês em que se comemora o Dia Internacional das Mulheres e Meninas na Ciência, e contou com a presença de mais de cem inscritos. Com palestras de altíssima qualidade, o evento foi aclamado por sua proposta de dar visibilidade para as cientistas brasileiras e suas pesquisas. A ideia para este encontro surgiu de forma bastante ingênua e apenas aos poucos nós, integrantes do comitê organizador, começamos a entender o potencial impacto que este evento poderia trazer para jovens pesquisadoras em busca de uma carreira científica. Aprendemos muito durante a organização. Apesar de vivenciarmos esta desigualdade de gênero na academia, entendemos melhor a dimensão do problema quando o avaliamos de forma crítica. As Astrocientistas nos deu essa oportunidade e este artigo é uma dedicatória ao aprendizado que experimentamos durante o processo de organização deste evento.

É importante frisar, no entanto, que foge ao nosso escopo neste trabalho analisar a questão de gênero na ciência de forma profunda, uma vez que não somos especialistas na área. Ainda assim, oferecemos um panorama do problema, indicando referências aos leitores, para melhor apresentarmos as diferentes questões abordadas durante a organização do evento.

Este artigo está organizado da seguinte forma: A seção 2 apresenta o problema da desigualdade de gênero em números. Escolhemos dividir esta seção em duas partes, sendo a subseção 2.1 voltada para pesquisas internacionais sobre o assunto. Na subseção 2.2, apresentaremos um compilado de análises quantitativas sobre a atuação de mulheres na física no Brasil, objetivando ilustrar, através de dados, a dimensão da desigualdade de gênero que a área enfrenta em nosso país, assim como a marginalização de outras minorias. Na seção 3, narramos a nossa experiência com a organização do evento. Também falamos sobre o processo de seleção e convite das palestrantes principais na seção 4. Trazemos o resultado de uma pesquisa feita durante o evento, com a participação dos inscritos, na seção 5. Por fim, apresentamos nossas conclusões e, em anexo, o título das palestras e suas respectivas autoras ou autores.

2 O problema em números: dados sobre a desigualdade de gênero

A sub-representação de mulheres na nossa área é evidente para qualquer pessoa que já se aventurou num departamento de física. Ainda assim, a dimensão do problema se mantém velada para a maioria. Então a questão deve ser abordada através de duas perguntas motrizes: Como medir essa desigualdade? Como reduzi-la?

Atualmente, diversos grupos de pesquisadores ao redor do mundo se dedicam à coleta de dados sobre questões como assédio, segregação, falta de representatividade e etc., para então, através de uma minuciosa análise, fornecer evidências de eficácia e impacto das medidas para sanar o problema. Vamos apresentar os resultados de algumas destas pesquisas em âmbito global e nacional, a fim de salientar as proporções da desigualdade, fornecendo um contexto para a nossa motivação para a organização do evento.

2.1 Estudos sobre a atuação de mulheres na ciência no âmbito global

De acordo com os dados mundiais, o percentual de mulheres na academia diminui consideravelmente à medida que o nível de carreira aumenta. Para tentarmos entender o porquê desta evasão desproporcional, é interessante analisar a situação através do estudo de fenômenos conhecidos como [1]:

- *o diagrama de tesoura*, que representa o fato de que mulheres são “cortadas” da carreira de cientistas;
- *a tubulação com vazamento*, que refere-se à situação onde as mulheres desaparecem em números desproporcionais em cada estágio da evolução de carreira acadêmica;
- *exclusão horizontal*, que expressa a distribuição desigual de mulheres e homens em vários campos científicos;
- *exclusão vertical*, que explicita a falta de representatividade feminina em todas os níveis de hierarquias científicas;
- *o teto de vidro*, que expõe o desequilíbrio de gênero nas escolhas feitas pela academia.

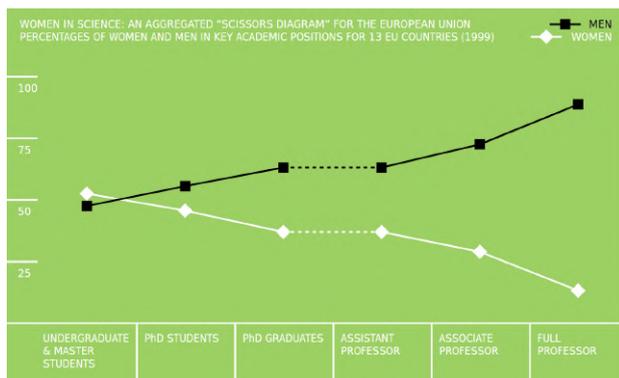


Figura 1: Em branco, o número percentual de mulheres em posições acadêmicas. Em preto, o número de homens que ocupam a mesma posição. Créditos: figura retirada da Ref. [1].

A Figura 1 é uma ilustração do diagrama de tesoura, evidenciando a grande diferença na porcentagem de mulheres e homens em posições acadêmicas chave para 13 países da União Europeia no ano de 1991.

Uma das iniciativas que se propôs a identificar esses fenômenos e produzir ações para remediá-los foi a União Internacional de Física Pura e Aplicada (IUPAP, na sigla em inglês),¹ cujo um dos objetivos é aumentar a diversidade e inclusão na física, incentivando a participação e reconhecimento de pessoas de grupos minoritários. Desde então uma série de conferências, assembleias e resoluções vêm sendo desenvolvidas para abordar a questão.² A IUPAP é a única organização internacional de física que é organizada e administrada pela própria comunidade da física. Ela foi estabelecida em 1922 em Bruxelas, com 13 países membros. A primeira Assembleia Geral foi realizada em 1923 em Paris. Atualmente conta com 60 países membros, e a 29^a (e mais recente) Assembleia Geral da IUPAP foi realizada em São Paulo, Brasil, em 2017.

Na América Latina, um dos eventos visionários é o CIÊNCIA-MULHER, um evento que agregou mulheres pesquisadoras das ciências exatas e da vida para discutir a posição e participação da mulher dentro destas comunidades. A primeira conferência foi realizada no Rio de Janeiro em 2004,³ passando por diversos países, como, por exemplo, México, Bolívia e Guatemala.

¹<https://iupap.org/who-we-are/>.

²Para maiores informações sobre as conferências de 1999 – 2013, ver Ref. [2].

³Confira o site do evento no link <http://www.cbpf.br/~mulher/>.

Em números, dados estatísticos sobre mulheres e ciências em 30 países europeus foram publicados pela primeira vez em 2002 pelo Grupo de Helsinque sobre Mulheres e Ciência. No seu relatório [3], eles fornecem informações sobre as políticas nacionais sobre as mulheres e a ciência em 15 países membros da União Europeia (UE) e nos 15 países associados ao *Fifth Framework Programme* (1996 – 2001). O Instituto de Estatística da UNESCO também provê dados mundiais importantes, com pesquisas sobre a participação das mulheres na ciência na América Latina, Caribe, Europa, África, Ásia e Pacífico. De acordo com os dados de 2018, as maiores e menores porcentagens de pesquisadoras em cada região são:

- Europa: a maior porcentagem está na Macedônia do Norte, com 53,4%, e a menor porcentagem é encontrada na Holanda, com 26,4%;
- África: a maior porcentagem está na Tunísia, com 56,1%, e a menor porcentagem é encontrada no Chade, com 0,4%;
- Ásia: a maior porcentagem está no Myanmar, com 75,6%, e a menor porcentagem é encontrada no Nepal, com 7,8%;
- Pacífico: a maior porcentagem está na Nova Zelândia, com 52%, e a menor porcentagem é encontrada na Papua Nova Guiné, com 33,2%;

A Figura 2 ilustra a quantidade de mulheres pesquisadoras como uma porcentagem do número total de cientistas na América Latina e Caribe. Esses números incluem pesquisadoras em tempo parcial e em tempo integral.

É importante ressaltar que, apesar da pesquisa informar a proporção de pesquisadoras mulheres no mundo, ela não captura fatores importantes, tais quais salários, anos de emprego e lugar na hierarquia acadêmica.

Adicionalmente, a relação entre desigualdades de gênero e o departamento de física foi explorada por Cathrine Hasse e Stine Trentemøller [5] em 2011. Os autores concluíram que diferentes culturas do local de trabalho incluem e excluem membros de acordo com a forma como consideram medidas de reconhecimento de atos criativos, tomada de risco, “ciência útil” e competição. Eles apontam que, não somente a cultura



Figura 2: Percentagem de pesquisadoras mulheres com relação ao número total de pesquisadores em países da América Latina e Caribe [4]. Os indicadores $-n$ em frente ao nome dos países representam o ano em que os dados foram avaliados: ano de (2018 $- n$). Créditos: cortesia da Instituição de Estatística da UNESCO (UIS, na sigla em inglês). Fonte: unesco.org.

da sociedade é um fator decisivo para a questão de desigualdade de gênero, mas a comunidade física em si possui hábitos que contribuem para este problema. Esta pesquisa foi realizada em cinco países europeus, Dinamarca, Estônia, Finlândia, Itália e Polônia, e três tipos de cultura foram identificados.

- **Cultura de Hércules:**
Esta é a cultura do lutador, em que o processo acadêmico é visto como extremamente competitivo e os pesquisadores têm que provar que estão no topo das suas áreas para exercer uma dada função;
- **Cultura do cuidador:**
Esta é a cultura social, na qual o trabalho em equipe é valorizado como fundamental para melhores resultados;
- **Cultura de trabalho das abelhas:**
Esta é a cultura da indústria, em que pesquisadores se comportam como abelhas operárias sem muita personalidade.

Os autores encontraram uma maior proporção de mulheres físicas na Itália, onde elas constituem 33% dos professores associados e 23% dos professores catedráticos, e a menor proporção de mulheres físicas na Dinamarca, que constituem 10% entre os professores associados e apenas 3% dos professores catedráticos. A Tabela 1 sumariza o tipo de cultura que define os departamentos de física nestes países. Apenas a Finlândia não apresentou uma cultura definida.

Outro resultado interessante foi publicado por Cimpian, Kim e McDermott em 2020 [6], no qual eles mostram um número surpreendentemente grande de homens de baixo desempenho se formando nas disciplinas de física, engenharia e ciência da computação (PECs), comparado à participação das mulheres, nos EUA. O estudo sugere que a cultura acadêmica nessas áreas dificulta a entrada de mulheres com desempenho mediano, mas não a de homens, mostrando a irracionalidade do medo de que o aumento no número de mulheres implicaria na diminuição da qualidade na pesquisa.

Os esforços para coletar mais dados e entender melhor o problema não param. Recentemente, por exemplo, o projeto Lacuna de Gênero na Ciência — Uma Abordagem Global para a Lacuna de Gênero em Matemática, Computação e Ciências Naturais⁴ colhe informações, através de pesquisas globais de cientistas, análise de publicações acadêmicas e banco de dados de boas práticas, para fornecer evidências em apoio à tomada de decisões informadas sobre políticas científicas. Outra iniciativa interessante é o *website* 1400 Degrees, lançado no dia 7 de junho de 2021. Ele é um diretório que destaca as realizações e contribuições de mulheres e minorias marginalizadas para os campos da física e da astronomia. O nome representa a temperatura na qual alguns tipos de vidro começam a se transformar e serve como uma metáfora para a missão do projeto — o ponto de fusão em que o teto de vidro da física se transforma em uma janela de oportunidade. Para se cadastrar na plataforma e fazer parte dessa rede de suporte, mulheres e minorias só precisam de um e-mail institucional.⁵

Em geral, estas pesquisas mundiais têm um papel fundamental de descortinar a questão de gênero e mobilizar cientistas a exigir democratização na ciência. Através de dados, relatos e divulgações de estudos, aos poucos se torna claro que, ao invés de tentar corrigir as mulheres, a comunidade acadêmica deve repensar como descrevemos e aplicamos a física. A diversidade de saberes e práticas só traz vantagens para a comunidade científica.

⁴Original em inglês: *Gender Gap in Science — A Global Approach to the Gender Gap in Mathematical, Computing, and Natural Sciences: How to Measure It, How to Reduce It?* (<https://gender-gap-in-science.org/project/>).

⁵O cadastro é feito em <https://1400degrees.org/>.

Tabela 1: As três culturas da física, de acordo com a Ref. [5].

Culturas	Países	% de professoras
Hércules	Dinamarca	3 %
Cuidador	Itália	33 %
Operário	Estônia e Polônia	11 % e 14 %

2.2 Números sobre a atuação de mulheres na física no âmbito nacional

No Brasil, as pesquisas sobre a questão de gênero na física começaram a ganhar mais atração com o surgimento da Comissão de Relações de Gênero da Sociedade Brasileira de Física em 2003. Em 2015, o grupo lançou o livro *Mulheres na Física, Casos Históricos, Panorama e Perspectivas* [2], que aborda grandes contribuições de mulheres à física, tanto no âmbito internacional quanto nacional, e apresenta dados que tornam explícita a existência de problemas a serem enfrentados pelas profissionais e estudantes da área.

Ao abordar o percentual de mulheres e homens bolsistas em programas de iniciação científica (Programa de Bolsas de Iniciação Científica - IC, e Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC), de mestrado, de doutorado e de produtividade em pesquisa no período de 2001 a 2012, evidencia-se a menor participação feminina⁶ e a evasão das mulheres à medida que se avança na carreira. No ano de 2012, as bolsas de iniciação científica PIBIC e IC concedidas a homens constituíram cerca de 64% e 74% do total de bolsas, respectivamente. No mesmo ano, as bolsas de mestrado e doutorado concedidas a homens representaram cerca de 80% e 83% do total de bolsas nas respectivas categorias. Já as bolsas de produtividade (destinadas a professores) concedidas a homens no mesmo ano constituíram cerca de 88% do total de bolsas. Representações gráficas com porcentagens mais precisas e informações sobre os demais anos podem ser encontradas em [2]. A desigualdade se mostra estável ao longo do período analisado, com poucas variações nos números, indicando que avanços efetivos na atuação feminina na área não têm sido alcançados.⁷

⁶A maior porcentagem de bolsistas mulheres é vista na categoria de bolsas de iniciação científica PIBIC em 2012, constituindo cerca de 40% do total de bolsas concedidas.

⁷Um sutil aumento da participação feminina é observado nas bolsas PIBIC. Entretanto, o aumento não é pro-

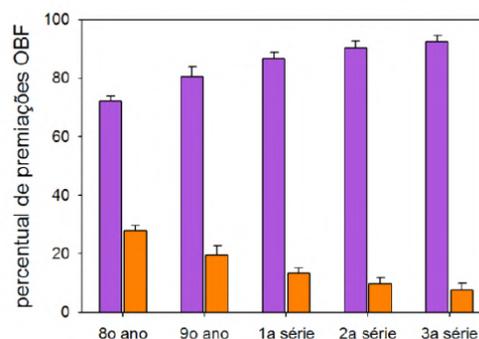


Figura 3: Figura apresentada na Ref. [7]. Legenda original: “As colunas representam o percentual de mulheres (laranja) e homens (lilás) com premiações em cada ano escolar. Os valores apresentados correspondem à média calculada sobre os anos 2006-2015 (exceto de 2012-2015 para o 8º ano) e as barras de erro mostram o desvio padrão.”

O fenômeno da evasão feminina à medida que se avança na carreira ou nos estudos, conhecido como efeito tesoura ou corte vertical, é observado desde a fase escolar. Em [7], o número de premiações nas Olimpíadas Brasileiras de Física de 2006 a 2015 é utilizado como um indicativo da quantidade de meninas interessadas por física do 8º ano do ensino fundamental ao 3º ano do ensino médio. A média calculada sobre este período (exceto de 2012 a 2015 para o 8º ano) mostra que a porcentagem de premiações nas Olimpíadas, incluindo menções honrosas, medalhas de ouro, de prata e de bronze, é maior para os meninos em todos os anos escolares analisados, como mostra a Figura 3.

No 8º ano do ensino fundamental, cerca de 71% das premiações foram concedidas a meninos. No 9º ano do ensino fundamental e no 1º, 2º e 3º anos do ensino médio, tal porcentagem sobe para cerca de 80%, 88%, 90% e 91%. Dessa forma, os dados indicam que o corte vertical se inicia antes mesmo da escolha profissional.

Em [7] são também apresentados dados similarmente para as bolsas de mestrado.

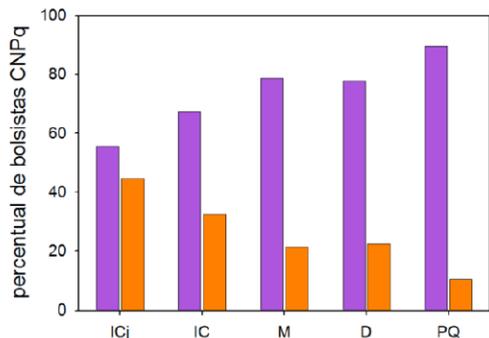


Figura 4: Figura apresentada em [7]. Legenda original: “Percentual de bolsistas do CNPq mulheres (laranja) e homens (lilás): iniciação científica júnior (ICj), iniciação científica (IC), mestrado (M), doutorado (D) e produtividade em pesquisa (PQ).”

res aos de [2] com relação a bolsas de iniciação científica, mestrado, doutorado e de produtividade em pesquisa, e dados referentes à iniciação científica júnior. Estes estão representados na Figura 4.

Tal efeito tesoura pode ser uma consequência de diversos fatores. Um exemplo frequentemente mencionado é a maternidade. A mesma pode levar a uma diminuição da produtividade da pesquisadora ou estudante e até mesmo à desistência gerada pela sobrecarga. Essa é uma dificuldade objetiva que certamente precisa ser abordada. Entretanto, este fator não é único. Outros fatores sistêmicos, inclusive de caráter subjetivo, estão presentes ao longo da jornada acadêmica de forma contínua. Precisamos nos questionar sobre diferentes aspectos: As meninas na fase escolar têm seu interesse por física estimulado? É dado a elas incentivo para seguir uma carreira científica? As alunas de graduação se sentem acolhidas em um ambiente muitas vezes masculinizado? Os processos seletivos de pós-graduação possuem uma proporção equilibrada de homens e mulheres aprovados? Os departamentos estão criando estratégias para aumentar o número de mulheres entre os docentes e pesquisadores? As estudantes e pesquisadoras têm espaço em reuniões de grupo, colaborações, seminários, discussões e conferências? É necessário levantar essas e outras questões, entender as dificuldades de forma clara e instituir medidas concretas e diversificadas para enfrentá-las.

Por fim, tendo em vista que a luta por igualdade e inclusão só é efetiva se englobar todas as

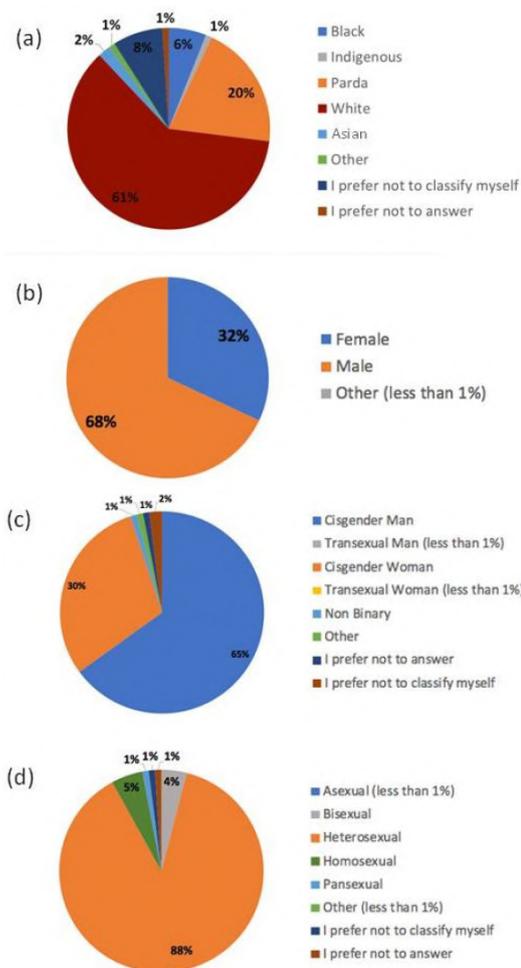


Figura 5: Figura apresentada em [8]. Legenda original (tradução nossa): “Perfil dos respondentes de acordo com etnia/raça (a), sexo (b), gênero (c) e orientação sexual (d).”

minorias, é de fundamental importância que seja dada atenção ao espaço de grupos como o de mulheres e homens negros, homossexuais, transexuais, dentre outros, no ambiente acadêmico. Uma pesquisa realizada no período de 3 de julho a 21 de setembro de 2018, respondida por membros da Sociedade Brasileira de Física, traça um perfil da comunidade de estudantes e pesquisadores em física no Brasil através da análise de aspectos geográficos, raça, etnia, sexo, gênero, orientação sexual e deficiências [8].

Dentre os participantes, 32% responderam ser do sexo feminino. Com relação ao gênero, 30% são mulheres cisgênero, menos de 1% mulheres transexuais, menos de 1% homens transexuais e 1% não binários. No que diz respeito à orientação sexual, 5% são homossexuais, 4% bissexuais, menos de 1% assexuais e 1% pansexuais. Já as

respostas com relação à etnia apresentam 20% de pardos, 6% de negros, 1% de indígenas e 2% de asiáticos. As opções “Outro”, “Eu prefiro não responder” e “Eu prefiro não me classificar” também foram consideradas. Mais detalhes são apresentados na Figura 5.

Os dados mostram de forma clara o perfil da comunidade em questão: homens cisgênero (65%), heterossexuais (88%) e brancos (61%). Na contramão, as dificuldades se mostram bastante limitadoras para os indivíduos pertencentes a uma ou mais minorias marginalizadas. Os demais resultados da pesquisa podem ser encontrados em [8].

3 Sobre o evento As Astrocientistas

A comissão organizadora do evento As Astrocientistas é formada pelos doutores Emmanuel Frion e Rodrigo von Marttens, além das autoras deste artigo, Carla Rodrigues Almeida, Paola Delgado e Tays Miranda. Todos nós, em um momento ou outro, fomos doutorandos em física na Universidade Federal do Espírito Santo, no Brasil. Além do vínculo institucional, somos também pesquisadores que trabalham em diversos tópicos da astrofísica, cosmologia e gravitação.

A ideia do projeto As Astrocientistas nasceu em meados de outubro de 2020, quando decidimos transformar nossa frustração com o recente retrocesso acadêmico no Brasil, impulsionado por uma crise política e a pandemia do COVID-19, em algo positivo. Em meio a uma onda de agenda anticientífica em nosso país e a percepção do crescimento da discriminação contra grupos minoritários, parecia apropriado celebrar a ciência brasileira e as pesquisadoras que trabalham em nosso campo com uma conferência para comemorar o Dia Internacional das Meninas e Mulheres na Ciência, 11 de fevereiro. A primeira edição do As Astrocientistas – um neologismo referente às pesquisadoras que trabalham com astrofísica, cosmologia e gravitação – foi virtual, realizada majoritariamente em português e ocorreu entre os dias 8 e 11 de fevereiro de 2021. As Astrocientistas: Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres na Astrofísica, Cosmologia e Gravitação é a nossa homenagem às pesquisadoras historicamente negligenciadas que são brasileiras ou possuem vínculos com nosso país.

Nós, do Comitê Organizador, somos um grupo de pesquisadores em início de carreira traba-

lhando em diferentes partes do mundo e, portanto, sem uma instituição anfitriã para patrocinar este projeto. Para validar nossa causa e reafirmar às palestrantes convidadas a sinceridade do nosso convite, contamos com o apoio do Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGCosmo - UFES), do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e das instituições internacionais Instituto para Estudos Avançados em Ciências Humanas (KWI),⁸ da Alemanha, e Universidade de Jyväskylä (JyU), da Finlândia.

O projeto As Astrocientistas começou como uma ideia muito simples que evoluiu e cresceu além da nossa imaginação. Olhando em retrospectiva, o peso político desse evento tornou-se evidente para nós quando estávamos relembrando o nosso método organizacional. Para as três mulheres do comitê organizador, a luta para usar sempre 110% dos esforços para atingir os nossos objetivos em um ambiente dominado pelos homens tornou-se rotina, mas foi uma experiência nova para os dois organizadores homens, que relataram sentir uma pressão maior para obtermos um resultado de excelência. Percebemos a posteriori que, se tivéssemos falhado, não seria apenas um fracasso pessoal para nós. A nossa falta de êxito poderia enviar uma mensagem errada para nossa comunidade, podendo ser inadequadamente adotada como exemplo contra futuras tentativas de promoção de grupos minoritários.

Hoje percebemos que, apesar de todos os problemas que a pandemia gerou, a trivialização de encontros completamente virtuais nos permitiu configurar este evento de forma barata e acessível, sem a preocupação de custos com viagens e hospedagens e alcançando uma maior audiência, incluindo pessoas de fora da academia que demonstraram interesse pelo tema. Mesmo com o planejamento cuidadoso, não poderíamos ter previsto esse nível de sucesso. O entusiasmo dos participantes e as palestras de alta qualidade ministradas por nossas convidadas foram avassaladores, aumentando a pilha de evidências de que as mulheres podem fazer ciências tão bem quanto seus colegas homens, se tiverem oportunidade.

Uma de nossas tarefas mais difíceis foi escolher quem convidar dentre tantos pesquisadores talentosos. Neste quesito, priorizamos a diversidade,

⁸ *Kulturwissenschaftliches Institut Essen.*

entendendo que não haveria perda de qualidade seguindo este critério. Nosso objetivo foi trazer o tema da conferência de forma sensata, mas sem descuidar de sua relevância política. Com isso em mente, incluímos discussões em mesa redonda no programa para dar voz às mulheres cientistas em importantes questões científicas e políticas, inspirando a próxima geração de meninas e mulheres em astrofísica, cosmologia e gravitação. No dia final do evento, precisamente no Dia Internacional de Meninas e Mulheres na Ciência, demos as boas-vindas à ganhadora do Prêmio Nobel em física do ano de 2020, Andrea Ghez, para uma palestra especial. Foi uma imensa honra ouvir uma das quatro cientistas que já receberam essa honraria para falar em nossa conferência. Ela é uma inspiração para toda uma geração de meninas e mulheres na física, e não podemos agradecer-lá o suficiente por sua participação.

Outro ponto de discussão durante a organização foi como abordar a participação dos homens neste evento. As Astrocientistas seria uma celebração de mulheres e meninas na ciência e entendemos isso como uma causa que pode e deve ser comemorada pelos homens também. Abrimos as inscrições para apresentações orais e pôsteres a todos, mas, para nos mantermos fiéis ao tema, pedimos aos homens que apresentassem o trabalho de mulheres cientistas, sejam estas colaboradoras ou outras pesquisadoras que eles admiram. Essas informações estavam explícitas em nosso site e nas nossas redes sociais e, ainda assim, a pergunta mais frequente que recebíamos era se homens também poderiam participar da conferência. Isso nos indicou que a comunicação não foi suficientemente efetiva, pois mesmo os interessados em homenagear as nossas convidadas não tinham a certeza do nosso objetivo, embora não saibamos o que poderíamos ter feito melhor neste sentido.

Desde o início, o registro de participantes do sexo feminino superou o número de participantes do sexo masculino por uma margem significativa. Para nós, foi a primeira vez que participamos de uma conferência de física com mais participantes do sexo feminino. Foi uma vitória! Com oportunidades e um espaço seguro, as mulheres podem prosperar neste ambiente. Mas a vitória foi agriçoce ao mesmo tempo. Essa razão de mulheres para homens não reflete o cenário atual das astrociências brasileiras, que ainda é predo-

minantemente masculina. Dada a qualidade das palestras, por que houve tão pouco interesse dos pesquisadores do sexo masculino? Esta questão permanece em aberto.

Infelizmente não fomos capazes de conseguir financiamento nacional para a produção dos Anais do evento, o que é um claro indicativo da situação precária que a ciência brasileira se encontra. A primeira edição do Astrocientistas, um evento bem sucedido que exalta pesquisadoras brasileiras de excelência, foi completamente financiado por instituições estrangeiras. Em particular, os Anais serão patrocinados inteiramente pela Universidade de Jyväskylä.

Hoje, quando o Brasil é ameaçado pelo negacionismo e os abissais cortes de verbas destinadas a ciência e tecnologia, o sucesso do Astrocientistas nos oferece um raio de esperança. Ainda há muito a aprender e melhorar em nossa sociedade, mas esses pequenos passos se mostram como a melhor maneira de seguir em frente. Esta será a primeira de muitas edições que visam criar diversidade, equidade e inclusão para a comunidade científica brasileira.

4 Convidadas

A fim de homenagear e dar visibilidade às pesquisadoras brasileiras ou com vínculos fortes com o Brasil, o comitê organizador do As Astrocientistas convidou 13 mulheres a apresentarem seus trabalhos nas áreas de astrofísica, gravitação e cosmologia. A seleção das convidadas foi feita por todos os membros do comitê em conjunto, levando em consideração a abordagem de diferentes temas, diversidade regional e representatividade de mulheres pertencentes a outros grupos marginalizados. A grande dificuldade não foi encontrar pesquisadoras de excelência, mas sim selecionar um pequeno grupo em uma lista tão extensa.

As convidadas da primeira edição do evento foram Angela Olinto (Universidade de Chicago), Beatriz B. Siffert (UFRJ), Carolina Loureiro Benone (UFPA), Dinalva Aires de Sales (IMEF - FURG), Elisa G.M. Ferreira (USP e Instituto Max Planck para Astrofísica), Leila Graef (UFF), Maria Elidaiana da Silva Pereira (Universidade de Hamburgo), Mariana Penna-Lima (UnB), Micol Benetti (Universidade de Nápoles Federico II), Miriani Pastoriza (UFRGS), Natalia Vale Asari (UFSC), Rita de Cássia dos Anjos (UFPR) e

Vivian Miranda (Universidade do Arizona). Os títulos das palestras e uma breve introdução às carreiras acadêmicas das palestrantes convidadas podem ser encontrados no Apêndice A. Também convidamos a pesquisadora Érica de Mello Silva (UFTM), que integra o Grupo de Trabalho sobre Questões de Gênero da Sociedade Brasileira de Física desde 2019, para liderar uma discussão mais aprofundada sobre a participação de mulheres na ciência.

O fechamento do evento aconteceu no Dia Internacional de Meninas e Mulheres na Ciência, celebrado anualmente em 11 de fevereiro. Para a palestra de encerramento, tivemos a imensa honra de receber Andrea Ghez (Universidade da Califórnia), vencedora Prêmio Nobel de Física no ano de 2020. Além da oportunidade de ouvir sobre seu trabalho, vimos que a trajetória de uma mulher na ciência é desafiadora, ainda que se trate de uma futura Prêmio Nobel. O convite à Ghez, que é americana e apresentou em inglês, foi além da proposta inicial de homenagem à pesquisadoras brasileiras ou com vínculos com o Brasil. Dentre os 219 laureados com o Nobel de Física até então, apenas 4 são mulheres, correspondendo a aproximadamente 1,83%. Por isso, julgamos que a participação da Ghez seria encorajadora, não só por ela ser uma mulher pesquisadora, mas porque sua contribuição científica é de extrema relevância para as astrociências. Ghez foi laureada pela descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro de nossa galáxia [9, 10], partilhando o prêmio com Roger Penrose e Reinhard Genzel.

O evento também contou com a apresentação de 11 comunicações orais e 25 pôsteres, cujos títulos e autores também podem ser encontrados no Apêndice A.

5 O que aprendemos com o evento

Organizar o evento As Astrocientistas foi uma experiência enriquecedora e desafiadora em diversos aspectos. Além de todo o trabalho usual atribuído a comitês organizadores em geral, tivemos que nos atentar ao caráter social e político do encontro. Em um momento de tamanha intolerância e negacionismo em nosso país, quisemos criar um meio de discussão científica inclusivo e receptivo, assegurando o espaço e a participação ativa das minorias. Na prática encontramos diversos desafios a esse objetivo e, ao enfrentá-los, tivemos

a chance de perceber com mais clareza algumas das dificuldades impostas às pessoas marginalizadas na ciência e, por fim, aprender com elas.

Um dos primeiros problemas que tivemos que endereçar foi a dificuldade de estabelecer o caráter científico do evento. Por mais que o site e as mídias sociais do encontro deixassem clara uma proposta acadêmica nas áreas de astrofísica, gravitação e cosmologia, muitos dos receptores da divulgação tomaram o evento única e estritamente como uma discussão sobre gênero. Esse foi, certamente, um tema abordado durante as discussões. Organizamos uma mesa redonda intitulada Mulheres e Meninas na Ciência - Desafios e Oportunidades, que contou com a participação das pesquisadoras Érica de Mello Silva, Dinalva Aires de Sales, Leila Graef e Micol Benetti, sem mencionar a ativa participação dos inscritos. Entretanto, o foco principal, desde o início, foi promover a interação e a discussão entre estudantes e pesquisadoras atuantes nas áreas mencionadas. Abrimos espaço para a discussão de temas científicos relevantes, com mesas redondas focadas no cenário atual das astrociências, com a participação de Caroline Benone, Natália Vale Asari e Vivian Miranda, e o futuro das pesquisas em astrofísica cosmologia e gravitação, cuja discussão foi liderada por Angela Olinto, Elisa Ferreira, Maria Elidaiana da Silva e Mariana Penna-Lima.

Apesar da surpresa inicial que tivemos ao nos deparar com essa situação em que os objetivos do evento foram de certa forma mal interpretados, não é difícil relacioná-la ao constante distanciamento imposto entre o feminino e o científico. Da mesma forma que mulheres enfrentam obstáculos para serem identificadas como cientistas, um evento sobre pesquisas de mulheres enfrentou problemas para ser identificado como científico. Apesar de termos, por fim, alcançado o caráter almejado na primeira edição do encontro, hoje compreendemos que esforços extras nesse sentido são fundamentais.

A fim de aproveitar ao máximo a oportunidade apresentada com este tipo de evento, um contraespaço para dar voz às mulheres cientistas, coletamos algumas informações dos participantes através de uma pesquisa (opcional) disponível para participação durante esta primeira edição do evento As Astrocientistas. Os dados coletados sobre gênero confirmam a pouca participação masculina. Ao contrário da imensa maioria dos

Gênero
103 respostas

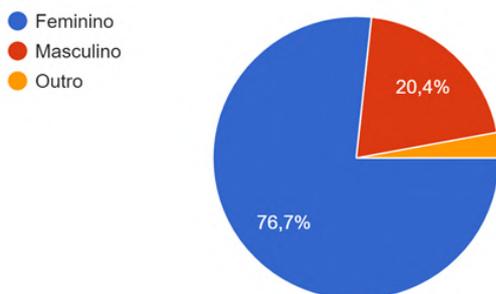


Figura 6: Participação por gênero da primeira edição do evento As Astrocientistas.

Área

103 respostas



Figura 7: Áreas de atuação dos inscritos na primeira edição do evento As Astrocientistas.

eventos acadêmicos na área da física, As Astrocientistas teve uma participação expressivamente maior de mulheres. Na Figura 6 apresentamos as porcentagens de participação por gênero.

A pesquisa respondida pelos participantes durante o evento também nos forneceu uma informação extremamente relevante sobre as áreas de atuação dos inscritos. Na Figura 7 apresentamos as porcentagens de estudantes e pesquisadores atuantes nas diferentes áreas abordadas pelo encontro. A reduzida participação de pessoas da gravitação chama atenção, sobretudo pelo caráter teórico da área. Certamente precisamos endereçar essa questão nas edições futuras do evento, direcionando palestras a essa categoria que, até então, se encontra sub-representada. Com relação à escolaridade dos inscritos, foi possível abranger os diversos níveis acadêmicos de forma bastante equilibrada, como pode ser visto na Figura 8.

Escolaridade

102 respostas

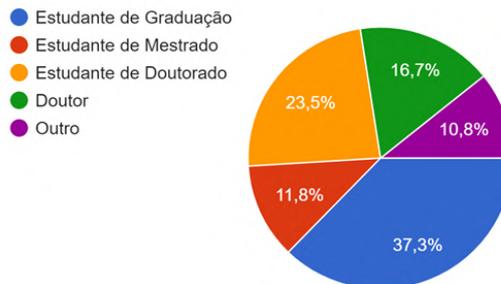


Figura 8: Escolaridade dos inscritos na primeira edição do evento As Astrocientistas.

Os dados também mostram uma concentração dos inscritos na região sudeste do Brasil, fenômeno já conhecido no cenário científico nacional. Apesar dos esforços do comitê organizador de incluir palestrantes e estudantes de diferentes regiões, ainda tivemos a maior parte dos inscritos sediada nos estados do Rio de Janeiro, Minas Gerais, São Paulo e Espírito Santo.

Mas talvez o maior aprendizado que tivemos foi com respeito à relevância de um evento como este. As conversas do comitê organizador durante o processo de organização foram bastante elucidantes, no sentido de que só quando pusemos a questão em palavras fomos capazes de compreender a dimensão do problema, apesar de vivenciar diariamente a desigualdade de gênero nas nossas áreas de pesquisa. Nós certamente falhamos em alguns aspectos, mas aprendemos que as vitórias fazem o esforço valer a pena.

6 Conclusão: um convite para ação

As Astrocientistas, I Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres na Astrofísica, Cosmologia e Gravitação, foi realizado de 08 a 11 de fevereiro de 2021 de forma virtual, de acordo com as normas de distanciamento social impostas para contenção da pandemia da COVID-19. O evento teve como objetivo homenagear as pesquisadoras brasileiras ou associadas ao Brasil num momento do nosso país onde a inversão de valores chegou a tal ponto que a ciência é negada e o preconceito celebrado. Durante a organização do evento, aprendemos que As Astrocientistas foi muito mais que uma homenagem; as palestras de altíssima quali-

dade e a ativa participação dos inscritos nos mostrou que este foi também um espaço de reflexão e colaboração para o combate à desigualdade de gênero dentro da academia.

Neste artigo, discutimos nosso aprendizado pessoal com a organização do evento As Astrocientistas e, para contextualizar essas questões, apresentamos de forma introdutória o cenário atual, global e brasileiro, identificando alguns fenômenos que se manifestam em diferentes estágios de formação acadêmica e dificultam o avanço de carreira de mulheres dentro da academia. Percebemos que, apesar da demanda crescente por estatísticas e análises comparáveis entre países sobre mulheres na ciência, os dados nacionais e seu uso na formulação de políticas costumam ser limitados. Mas que, felizmente, há um contínuo esforço para trazer luz para este problema tão debilitante para a ciência.

Dentro da academia, em particular em departamentos e institutos de física, há uma crença de que o cientista deve ser racional ao ponto de supressão de qualquer outro aspecto do consciente humano. Este estereótipo do cientista como um homem branco cuja personalidade é moldada em torno do seu entendimento de racionalidade é prejudicial para a ciência, pois diminui ou simplesmente apaga contribuições valiosas de pontos de vista diversos. Um resultado científico pode ser objetivo e removido de qualquer contexto humano, mas as práticas científicas não são. A perpetuação da ideia de que mulheres não são capazes de fazer ou não se interessam por ciência é prejudicial para o meio científico em mais de uma forma. Enquanto cientistas, devemos ter o entendimento do quanto a ciência é essencial para a sociedade e o futuro da nossa espécie. Mulheres correspondem a pouco mais da metade da população do nosso planeta, com capacidade para decidir, inclusive através do voto, a direção do nosso futuro. Desencorajar a participação e mesmo o interesse delas pela ciência se torna, então, contraintuitivo, visto que precisamos deste engajamento para continuar pautando nossas futuras decisões na ciência, que não é infalível, mas que é a aposta mais segura para deliberações políticas e econômicas.

As pesquisas internacionais evidenciam que, apesar de conseguirmos um progresso significativo, é possível que as desigualdades de gênero se repitam de outras formas, e por isso o debate

constante do tema se faz cada vez mais necessário. Mudanças simples podem ajudar bastante a diminuir esta lacuna, como abrir oportunidades para a contratação de mulheres qualificadas, orientar uma mudança sugestiva no programa de mentores e analisar a possibilidade de patrocínio. Ou, no mínimo, encorajar a participação de grupos minoritários em processos seletivos. Pesquisas mais robustas também podem nos ajudar a compreender as implicações da relação entre hábitos culturais, gênero e pesquisas científicas. Na realidade, atuais avanços na discussão de igualdade de gênero na física já fornecem possíveis indicativos de como enfrentar o problema. Algumas ações são de fácil implementação, como por exemplo:

- A valorização da diversidade dentro de uma equipe, em oposição ao enfoque em pesquisadores autossuficientes [11–13];
- Desenvolver mecanismos para evitar vieses contra grupos minoritários, o que pode ser feito através de treinamentos de conscientização.⁹ Além da formação, também é importante observar a atuação dos vieses constantemente em encontros, seleções de comitês, e etc. [14];
- Estar atento às microdesigualdades¹⁰ que ocorrem no dia a dia acadêmico e são extremamente prejudiciais para o desenvolvimento de relações saudáveis dentro de universidades e instituições de pesquisa [15];
- Levar em consideração perspectivas de gênero no desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa. É necessário lembrar que ciência só acontece através de cientistas, então há um acoplamento entre objeto de estudo e sujeito, e por isso representatividade é fundamental;¹¹
- A produção de contraespaços para dar suporte aos grupos que são marginalizados e discriminados.

⁹Um exemplo de atuação deste mecanismo pode ser encontrado em <https://implicit.harvard.edu/implicit/>.

¹⁰Microdesigualdades é um termo cunhado por Sue Rosser para descrever as desvantagens sutis mas que desempenham um papel central em todos os estágios da carreira da mulher.

¹¹Informações sobre como sexo/gênero podem ser características do que estudamos podem ser encontradas em <http://genderedinnovations.stanford.edu/>.

Hábitos são difíceis de serem mudados e micro-agressões e vieses são um desafio para se medir, mas essas pequenas ações fazem muita diferença e podem ser aspectos-chave para alguém seguir ou não a carreira de cientista. Projetos como o evento As Astrocientistas, por exemplo, se encaixam especialmente neste último item citado. O encontro foi um contraespaço para dar voz a esta minoria de pesquisadoras que trabalham com astrofísica, cosmologia e gravitação. E o sucesso do evento foi completamente atribuído à participação e animação dos inscritos, mostrando mais uma vez o quanto podemos alcançar com um esforço direcionado.

7 Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer primeiramente aos membros do comitê organizador, Emmanuel Frion e Rodrigo von Marttens, que abraçaram a causa e foram indispensáveis durante a organização do evento. Eles dividem os louros conosco, ativamente participando para a criação de um ambiente acadêmico diversificado. Agradecemos à Débora Menezes por nos dar permissão para apresentar os gráficos de sua pesquisa. Também estendemos os agradecimentos ao Prof. Nelson Pinto Neto, que muito gentilmente se prontificou a estabelecer nosso contato com a Prof^a Angela Olinto, nos Estados Unidos.

PCMD agradece o financiamento N^o UMO-2018/30/Q/ST9/00795 do National Science Centre, Polônia. TM agradece ao Prof. Tomas Brage por uma conversa estimulante e referências após uma sessão especial de diversidade apresentada no evento Physics Days 2021, que ocorreu virtualmente na Universidade de Jyväskylä.

Por fim, nosso muito obrigada a todos que participaram do evento As Astrocientistas, professoras, jovens pesquisadoras e a todos os inscritos. Vocês foram a razão do sucesso do evento.

Sobre as autoras

Carla R. Almeida (cralmeida00@gmail.com) é Mestre em Matemática e Doutora em Física pela Universidade do Espírito Santo. Ela é atualmente pós-doutoranda no Instituto de Física da Universidade de São Paulo e atua nas áreas de cosmologia quântica e história da física do século XX.

Paola C. M. Delgado (paola.moreira.delgado@doctoral.uj.edu.pl) é Mestre em Física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas no Rio de Janeiro. Atualmente faz doutorado na Universidade Jaguelônica em Cracóvia, onde estuda mecanismos de produção de ondas gravitacionais, sobretudo no universo primordial.

Tays Miranda (tays.miranda@helsinki.fi) é Doutora em Física pela Universidade Federal do Espírito Santo, com período sanduíche no Instituto de Cosmologia e Gravitação de Portsmouth, Inglaterra. Atualmente é pós-doutoranda na Universidade de Jyväskylä, onde estuda a física do universo primordial e a origem das estruturas em larga escala presentes no nosso universo.

Apêndice A: Palestras, comunicações orais e pôsteres

Importantes contribuições foram dadas por pesquisadoras, pós-graduandos e estudantes em diversos níveis acadêmicos. A seguir apresentamos os títulos e autores das palestras, comunicações orais e pôsteres que participaram do evento As Astrocientistas em fevereiro de 2021.

A.1 Palestras

- Multi-mensageiros cósmicos e suas mensagens na física de astropartículas - Angela Olinto (Universidade de Chicago).

Angela Olinto é doutora em física pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) e atuou em várias posições de destaque no cenário internacional, sendo inclusive diretora do Departamento de Astronomia e Astrofísica da Universidade of Chicago. Também foi vencedora de diversos prêmios e, mais recentemente, tornou-se membro da Academia Americana de Artes e Ciências. Seu trabalho tem como foco raios cósmicos de altas energias, assinatura indireta de partículas de matéria escura, efeitos cosmológicos de campos magnéticos, inflação natural e a estrutura interna de estrelas de nêutron, dentre vários outros interesses. Ela está à frente do projeto POEMMA, sigla em inglês para Sonda Astrofísica Multi-Mensageira [16].

- Astrobiologia: descobrindo novos planetas - Beatriz B. Siffert (UFRJ).

Beatriz Siffert é doutora em física pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência nas áreas de cosmologia e astrofísica, tendo trabalhado com detecção indireta de matéria escura, modelos cosmológicos com ricochete, e, atualmente, com supernovas do tipo Ia [17] e astrobiologia. É professora adjunta de física no Campus Duque de Caxias da UFRJ.

- Análogos gravitacionais: Histórico, modelos e perspectivas - Carolina Loureiro Benone (UFPA).

Carolina Loureiro Benone é doutora em física pela Universidade Federal do Pará, com período sanduíche na Universidade de Aveiro. Atualmente é professora adjunta da Universidade Federal do Pará - Campus Salinópolis. Seu trabalho tem ênfase em relatividade geral, trabalhando com modelos análogos gravitacionais. [18].

- AstroBioGeoQuímica: estudo de moléculas orgânicas em galáxias com buracos negros supermassivos e suas consequências para a vida na Terra - Dinalva Aires de Salles (IFME/FURG).

Dinalva Aires de Sales é doutora em física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tem experiência na área de astrofísica, atuando principalmente nos seguintes temas: núcleo ativo de galáxia, galáxia em interação, moléculas complexas, espectroscopia e imageamento [19]. Atualmente é professora adjunta e coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física do Instituto de Matemática, Estatística e Física da Universidade Federal do Rio Grande.

- A natureza da matéria escura e a matéria escura ultra-leve - Elisa G.M. Ferreira (Instituto Max Planck para Astrofísica).

Elisa Ferreira é doutora pela Universidade McGill e atualmente é professora no Instituto de Física da Universidade de São Paulo, sendo também associada ao Instituto Max Planck para Astrofísica. Sua área principal de pesquisa é a cosmologia, com foco no estudo da natureza da matéria escura e da energia escura e em como esses modelos podem ser testados com as observações atuais e

futuras [20]. Ela também é membro de colaborações internacionais como o Prime Focus Spectrograph e o Telescópio BINGO.

- Conectando o universo primordial e recente através das ondas gravitacionais e eletromagnéticas - Leila Graef (UFF).

Leila Graef é doutora em física pela Universidade de São Paulo, com período sanduíche na Universidade McGill. Atualmente é professora adjunta no Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense e trabalha na área de cosmologia, atuando principalmente nos seguintes temas: universo primordial, perturbações cosmológicas, radiação cósmica de fundo, energia escura e gravitação quântica [21].

- Pesando gigantes no céu: Cosmologia com aglomerados de galáxias - Maria Elidaiana da Silva Pereira (University of Michigan).

Maria Elidaiana da Silva Pereira é doutora em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Atualmente faz pós-doutorado na Universidade de Hamburgo. Realiza pesquisas na área de cosmologia observacional, estudando o efeito de lenteamento gravitacional, aglomerados de galáxias e ondas gravitacionais [22].

- Cosmologia com aglomerados de galáxias - Mariana Penna-Lima (UnB).

Mariana Penna-Lima é doutora em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Tem experiência nas áreas de cosmologia e gravitação [23]. Atualmente é Professora Adjunta do Instituto de Física da Universidade de Brasília. Além disso, é membro das colaborações internacionais LSST/DESC e JPAS.

- Cosmologia hoje e objetivos para as próximas décadas - Micol Benetti (University of Naples Federico II).

Micol Benetti é doutora em astrofísica relativística pela Universidade de Roma, La Sapienza. Fez pós-doutorado no Observatório Nacional e atualmente faz pós-doutorado na Universidade de Nápoles Federico II. Atua na área de cosmologia, tendo trabalhado com

modelos de universo primordial, extensões do Modelo Cosmológico Padrão e análise de dados a fim de vincular propriedades do universo primordial e tardio e de física fundamental através de observações cosmológicas [24].

- Interações de galáxias: efeitos sobre cinemática do gás e a formação de estrelas - Miriani Pastoriza (UFRGS).

Miriani Pastoriza é doutora em astronomia pela Universidade Nacional de Córdoba. Atualmente é professora colaboradora do Departamento de Astronomia do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde também é professora emérita. Tem experiência na área de astronomia, com ênfase em astrofísica extragaláctica, atuando principalmente nos seguintes temas: galáxias, formação estelar, núcleos ativos e interação de galáxias. Além disso, é membro titular da Academia Brasileira de Ciências. Uma de suas grandes contribuições científicas foi a descoberta e caracterização das galáxias Sérsic-Pastoriza, juntamente com o astrônomo José Luis Sérsic [25].

- O ciclo de vida das estrelas dá o compasso do enriquecimento químico de galáxias - Natalia Vale Asari (UFSC).

Natalia Vale Asari possui duplo doutorado em cotutela: doutorado em física, área de concentração astrofísica, pela Universidade Federal de Santa Catarina e doutorado em Astronomia e Astrofísica pelo Observatório de Paris. Tem experiência na área de astrofísica, com ênfase em astrofísica extragaláctica, atuando principalmente nos seguintes temas: evolução de galáxias, atenuação por poeira, espectroscopia-3D, síntese espectral e núcleos ativos de galáxias. Atualmente é Professora Adjunta na Universidade Federal de Santa Catarina [26].

- Galáxias starburst e rádio-galáxias como fontes de raios cósmicos de altíssimas energias - Rita de Cássia dos Anjos (UFPR).

Rita de Cássia dos Anjos é doutora em física pela Universidade de São Paulo, São Carlos. Atualmente é professora da Universidade Federal do Paraná no Setor Palotina

e trabalha com raios cósmicos de energias acima de 1EeV (Observatório Pierre Auger) e energias entre 10GeV e 100TeV (Cherenkov Telescope Array - CTA). Seu trabalho tem ênfase no estudo da propagação de raios cósmicos e interações de partículas e raios gama e no estudo da Equação de Schrödinger (Fokker Planck) [27]. É membro do Observatório de Raios Cósmicos Pierre Auger e membro do Observatório Cherenkov Telescope Array (CTA).

- O Universo conectado: relacionando o universo inicial, intermediário e tardio com dados cosmológicos - Vivian Miranda (Universidade of Arizona).

Vivian Miranda é doutora pela Universidade de Chicago e atualmente faz pós-doutorado no Observatório Steward, da Universidade do Arizona. Além disso, colabora com o DESC-LSST. Em 2019, conquistou o Prêmio Leona Woods Distinguished Postdoctoral Lectureship. Ela investiga como as teorias da inflação e da energia escura podem ser testadas com os dados observacionais [28].

A.2 Comunicações orais

1. Recuperando atmosferas de exoplanetas utilizando machine learning - Aline Novais (UFRJ);
2. Desvendando o meio interestelar de galáxias empoeiradas: uma análise astroquímica - Yanna Martins-Franco (OV/UFRJ);
3. Medidas de abundâncias a partir do método direto para galáxias com formação estelar ativa - Katia Slodkowski Clerici (UFSC);
4. Modelo cosmológico intrinsecamente simétrico na presença de fluidos dissipativos - Grasiela Batista dos Santos (UNIFEI);
5. Singularidades futuras repentinas e partículas - Olesya Galkina (UFES);
6. Perspectivas para a física de ultralargas escalas: inflação e efeitos relativísticos - Caroline Macedo Guandalin (IFUSP);
7. Primeiros passos na obtenção de parâmetros cosmológicos utilizando matrizes de covariância cosmológicas sem ruído - Natalí Soler Matubaro de Santi (USP);

8. Skewness como um teste para a energia escura - Raquel Fazolo (PPGCosmo);
9. Nova parametrização para a energia escura baseada no gás de Chaplygin generalizado - Dinorah Barbosa da Fonseca Texeira (ON);
10. Relatividade especial invariante sob o grupo de de Sitter e as curvas de rotação de galáxias - Adriana Victoria (Universidad Sergio Arboleda);
11. Trajetória e pesquisas de Eliade Lima - Lucas Bicalho (UESB);
10. Base Lunar – Divulgação de astronomia através de ilustrações – Ingrid dos Santos Beloto (IAG - USP);
11. Propriedades Fotométricas de Grupos e Aglomerados de Galáxias - Kethelin Parra Ramos (USP);
12. Um estudo comparativo do cometa C/1977 R1 (Kohler): Analisando fosses do Sistema Solar - Loreany Ferreira de Araújo (USP);
13. Fontes de raios cósmicos de altíssimas energias - Luana Natalie Padilha (UTFPR);

A.3 Pôsteres

1. Análise elementar do Meteorito condrito carbonáceo Águas Zarcas - Aisha Alana Persaud Leitch (UFRJ);
2. Tópicos da astronomia que contestam a teoria da Terra plana - Alice Taís Dummel Weide (EEEM Guararapes);
3. Ensino e divulgação de astrobiologia no ensino médio - Angela Ferreira Portella (UFRJ);
4. Caracterização mineralógica do meteorito brasileiro Serra Pelada e suas implicações para a história geológica do asteroide (4) Vesta - Bruna Mayato Rodrigues (Museu Nacional/UFRJ);
5. Sobre quasares, a formação de estruturas no Universo e tudo o mais - Carolina Queiroz de Abreu Silva (USP);
6. Projeto meninas na ciência incentiva a formação da identidade do grupo “Meninas do Guara” - Cristine Inês Brauwiers (EEEM Guararapes);
7. Campos magnéticos e seus efeitos na propagação de partículas - Débora Beatriz Götz (UFPR);
8. Propriedades do contínuo e do gás emissor de linhas largas em AGNs emissores de FeII - Denimara Dias dos Santos (INPE);
9. Terraformação de Marte - Gabriela Medeiros de Carvalho (IFCE);
14. Livro sobre buracos negros: de aluna para alunos - Luísa Machado Saldanha;
15. Meninas do Guara e a experiência das sessões de observação abertas à comunidade - Maiara Graff (EEEM Guararapes);
16. Anisotropia de raios cósmicos de Altíssimas Energias - Maria Clara Dari Gomes (UFPR);
17. Identifying protoclusters in distant universe - Mariana Rubet (UFRJ);
18. Estudo da formação de exoplanetas terrestres em regiões de ZH de sistemas binários - Mayra Meirelles Marques (UFRJ);
19. Magnetic effects of electrical discharges on Mars - Melissa de Andrade Nunes (IAG - USP);
20. Em busca de sinais de crescimento de buracos negros supermassivos em galáxias ultracompactas brilhantes no ultravioleta usando espectroscopia no infravermelho médio - Rayssa Guimarães Silva (Observatório do Valongo - UFRJ);
21. Um breve estudo sobre a estrutura das estrelas compactas - Tatiane Corrêa (UERJ);
22. Análise química e mineralógica dos condritos carbonáceos Allende e Murchison: implicações no surgimento da vida no Universo - Tatiane Peters Donato (Museu Nacional - UFRJ);
23. Relatividade especial de deSitter: implicações para a massa de aglomerados de galáxias - Thais Campos Santiago (IFT-UNESP);

24. Rotating neutron stars and modified gravity: Scalar charges and pulsar-timing observables in the presence of nonminimally coupled scalar fields - Tulio Ottoni Ferreira da Costa (PPGCosmo);
25. Analema: descrição da trajetória aparente do Sol durante o período de translação da Terra - Yalle Carolina Ferreira da Silva (UESB);

Referências

- [1] L. Koch-Miramond, *Women and science: Moving away from discrimination in europe*, Euroscience News **24**, 4 (2002). Disponível em https://www.euroscience.org/wp-content/uploads/pdf/ES_News_24.pdf, acesso em jan. de 2022.
- [2] E. Saitovich et al. (eds.), *Mulheres na Física: Casos históricos, panorama e perspectivas* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2015).
- [3] T. Rees, *National Policies on Women and Science in Europe*, Tech. rep., European Commission, Research Women and Science (2002). Disponível em http://www.foroconsultivo.org.mx/eventos_realizados/mirada_ciencia_tecnologia_e_innovacion/bibliografia_genero_web/national_policies_on_women_and_science_in_europe.pdf, acesso em jan. de 2022.
- [4] UNESCO Institute for Statistics, *Women in Science* (2020), Fact Sheet FS/2020/SCI/60. Disponível em <http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/fs60-women-in-science-2020-en.pdf>, acesso em jan. de 2022.
- [5] C. Hasse e S. Trentemøller, *Cultural work place patterns in academia*, *Science & Technology Studies* **24**(1), 6 (2011).
- [6] J. R. Cimpian, T. H. Kim e Z. T. McDermott, *Understanding persistent gender gaps in STEM*, *Science* **368**(6497), 1317 (2020).
- [7] D. Menezes, C. Brito e C. Anteneodo, *Mulheres na física: Efeito tesoura - da olimpíada brasileira de física à vida profissional*, Scientific American Brasil (177), 76 (2017).
- [8] C. Anteneodo et al., *Brazilian physicists community diversity, equity, and inclusion: A first diagnostic*, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.* **16**, 010136 (2020).
- [9] A. M. Ghez et al., *High proper-motion stars in the vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a supermassive black hole at the center of our galaxy*, *The Astrophysical Journal* **509**(2), 678 (1998). [ArXiv:astro-ph/9807210](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9807210).
- [10] A. M. Ghez et al., *Measuring distance and properties of the Milky Way's central supermassive black hole with stellar orbits*, *The Astrophysical Journal* **689**(2), 1044 (2008). [ArXiv:0808.2870](https://arxiv.org/abs/0808.2870).
- [11] R. Freeman e W. Huang, *Collaboration: Strength in diversity*, *Nature News* **513** (2014).
- [12] M. Nielsen, C. Bloch e L. Schiebinger, *Making gender diversity work for scientific discovery and innovation*, *Nature Human Behaviour* **2** (2018).
- [13] K. Powell, *These labs are remarkably diverse - here's why they're winning at science*, *Nature* **558** (2018).
- [14] J. Gvozdanović e K. Maes, *Implicit bias in academia: A challenge to the meritocratic principle and to women's careers - and what to do about it*, Tech. Rep. 23 (2018). Disponível em <https://www.leru.org/files/implicit-bias-in-academia-full-paper.pdf>, acesso em jan. de 2022.
- [15] S. Rosser, *Breaking into the Lab: Engineering Progress for Women in Science* (New York University Press, Nova York, 2012).
- [16] POEMMA Collaboration, *The POEMMA (Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) observatory*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**(06), 007 (2021).

- [17] R. C. V. Coelho et al., *Standardization of type Ia supernovae*, *European Journal of Physics* **36**(1), 015007 (2014).
- [18] L. A. Oliveira et al., *Analytical investigation of wave absorption by a rotating black hole analogue*, *International Journal of Modern Physics D* **29**(11), 2041018 (2020).
- [19] D. A. Sales, M. G. Pastoriza e R. Riffel, *Polycyclic aromatic hydrocarbon and emission line ratios in active galactic nuclei and starburst galaxies*, *The Astrophysical Journal* **725**(1), 605 (2010).
- [20] E. Ferreira, *Ultra-light dark matter*, *Astron. Astrophys. Rev.* **29** (2021).
- [21] L. L. Graef, R. O. Ramos e G. S. Vicente, *Gravitational particle production in loop quantum cosmology*, *Phys. Rev. D* **102**, 043518 (2020).
- [22] M. E. S. Pereira et al., *Weak-lensing calibration of a stellar mass-based mass proxy for redMaPPer and Voronoi Tessellation clusters in SDSS Stripe 82*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **474**(1), 1361 (2017).
- [23] M. Aguena et al., *CLMM: a LSST-DESC cluster weak lensing mass modeling library for cosmology*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **508**(4), 6092 (2021).
- [24] M. Benetti et al., *Dark sector interactions and the curvature of the universe in light of Plancks 2018 data*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**(08), 014 (2021).
- [25] J. L. Sérsic e M. Pastoriza, *Peculiar nuclei of galaxies*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **77**, 287 (1965).
- [26] 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 (2017). ArXiv:<https://academic.oup.com/mnras/article-pdf/474/3/3727/23002532/stx3022.pdf>.
- [27] R. C. dos Anjos et al., *High-energy gamma-ray emission from SNR G57.2+0.8 hosting SGR J1935+2154*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2021**(10), 023 (2021).
- [28] V. Miranda, P. Rogozenski e E. Krause, *Interpreting internal consistency of DES measurements*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **509**(4), 5218 (2021).

On the mode structure of imperfect fluids

Winfried Zimdahl

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Este artigo tenta apresentar um panorama simples de vários aspectos da estrutura modal na termodinâmica relativística fora do equilíbrio. Seu foco pedagógico está na relação entre os modos de perturbações de comprimento de onda longo da teoria causal de Müller-Israel-Stewart (MIS) e os modos da teoria tradicional de Eckart. Esta questão foi esclarecida, principalmente, em uma série de artigos assinados por Hiscock e Lindblom (veja [1–3]). Aqui, compilo algumas características essenciais sobre esse tópico que não exigem todo o formalismo da teoria completa.

Abstract

This paper tries to present a simple picture of several aspects of the mode structure in relativistic non-equilibrium thermodynamics. Its pedagogical focus is on the relation between long-wavelength perturbation modes of the causal Müller-Israel-Stewart (MIS) theory and those of the traditional Eckart theory. Principally, this issue was clarified in a series of papers by Hiscock and Lindblom (see [1–3]). Here, I put together some essential features of this topic which do not require the entire formalism of the complete theory.

Palavras-chave: termodinâmica fora do equilíbrio, teoria de Müller-Israel-Stewart, fluidos imperfeitos

Keywords: non-equilibrium thermodynamics, Müller-Israel-Stewart theory, imperfect fluids.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.36856](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.36856)

1 Introduction

Traditionally, thermodynamical processes out of equilibrium are described by the theories of Eckart [4] and Landau and Lifshitz [5]. With the works by Müller [6], Israel [7], Israel and Stewart [8, 9], Pavón, Jou, and Casas-Vázquez [10], Hiscock and Lindblom [1–3] it became clear, however, that the traditional theories suffer from serious drawbacks concerning causality and stability. These difficulties could be traced back to their restriction to first-order deviations from thermodynamical equilibrium. If one includes second-order deviations as well, the corresponding problems disappear. By now, it is generally agreed that any analysis of dissipative phenomena in relativity should be based on the theories by Müller, Israel, and Stewart (MIS), although, in specific cases, the latter might reproduce results of the Eckart theory [3]. Cosmological implications of second-order theories, also called causal thermodynamics, were first considered by Belinskii et al. [11]. Of particular interest in this context have been bulk-viscous cosmological models [12–19].

While conceptually the idea of including

second-order deviations from equilibrium is quite clear, the detailed implementation requires a rather extended formalism. Therefore it might be desirable to find a simplified but nevertheless exact (within a certain range) account of essential features of causal thermodynamics which focuses in detail on the points where it differs from Eckart-type theories. One of the shortcomings of the latter theories is their prediction of instabilities of perturbation modes on very short time scales. Our aim here is to clarify the origin of this different behavior for the case of long-wavelength modes in flat space-time.

We start our analysis by recalling basic relations of imperfect fluid dynamics in Sec. 2. This implies the structure of the energy-momentum tensor and that of the particle-flow vector. It follows a discussion of the conservation laws for particle number, energy and momentum, which includes the constitutive relations for the thermodynamic fluxes. Through these relations the difference between MIS and Eckart-type theories becomes manifest. Up to this point the formalism is kept general. In Sec. 3 we specify the general dynamics to linear perturbations about a

fluid at rest in Minkowski-space. This excludes all gravitational degrees of freedom. But since fluid-dynamical scales in most applications are smaller than gravitational scales, e.g., the Hubble scale in cosmology, the restriction to a flat background may nevertheless capture astrophysically and cosmologically relevant situations. Considering plane-wave solutions, the linearized conservation equations are then boiled down in Sec. 4 to a system of coupled algebraic equations in terms of perturbations of the number density and the temperature. This system serves as a starting point to investigate the long-wavelength mode structure, the main topic of this paper. We identify the origin of instabilities in Eckart's theory and point out how the MIS theory avoids such unphysical behavior. We emphasize that the propagation of acoustic modes including their damping through viscosity and heat conductivity, originally obtained within Eckart's theory, remains exactly valid in causal thermodynamics as well.

2 Imperfect fluids

2.1 Energy-momentum tensor and particle flow vector

The energy-momentum tensor of an imperfect fluid is generally given by (greek indices run over 0,1,2,3)

$$T^{\alpha\beta} = T_{(0)}^{\alpha\beta} + \pi h^{\alpha\beta} + \pi^{\alpha\beta} + q^\alpha u^\beta + q^\beta u^\alpha \quad (1)$$

with

$$T_{(0)}^{\alpha\beta} = \rho u^\alpha u^\beta + p h^{\alpha\beta} \quad (2)$$

and

$$\pi^{\alpha\beta} u_\beta = q^\alpha u_\alpha = \pi_\alpha^\alpha = h^{\alpha\beta} u_\alpha = 0, \quad (3)$$

$$u^\alpha u_\alpha = -1. \quad (4)$$

Here, ρ is the energy density of a fiducial thermodynamical equilibrium state, represented by the part $T_{(0)}^{\alpha\beta}$ of the total energy-momentum tensor, p is the corresponding equilibrium pressure, u^α is the fluid four-velocity in the Eckart frame and $h^{\alpha\beta} = g^{\alpha\beta} + u^\alpha u^\beta$ is the spatial projection tensor. The speed of light has been normalized to unity. The quantity π denotes that part of the scalar pressure which is connected with entropy production, $-\pi^{\alpha\beta}$ is the anisotropic stress tensor and q^α is the heat flux vector. Within the Eckart

frame the particle number flow vector N^α is given by

$$N^\alpha = n u^\alpha, \quad (5)$$

where n is the particle number density.

2.2 Conservation equations

The basic set of hydrodynamical equations follows from the conservation laws $N_{;\alpha}^\alpha = 0$ and $T^{\alpha\beta}_{;\beta} = 0$. This implies particle number conservation

$$\dot{n} + \Theta n = 0, \quad (6)$$

where $\Theta \equiv u_{;\alpha}^\alpha$ is the fluid expansion scalar and $\dot{n} \equiv n_{,;\alpha} u^\alpha$, as well as the energy conservation

$$\begin{aligned} \dot{\rho} + \Theta(\rho + p + \pi) + \nabla_\alpha q^\alpha \\ + 2\dot{u}_\alpha q^\alpha + \sigma_{\alpha\beta} \pi^{\alpha\beta} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

and the momentum conservation

$$\begin{aligned} (\rho + p + \pi) \dot{u}_\alpha + \nabla_\alpha(p + \pi) + \nabla^\beta \pi_{\alpha\beta} + \dot{u}^\beta \pi_{\alpha\beta} \\ + h_\alpha^\beta \dot{q}_\beta + \left[\omega_{\alpha\beta} + \sigma_{\alpha\beta} + \frac{4}{3} \Theta h_{\alpha\beta} \right] q^\beta = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

where $\nabla_\alpha q^\alpha \equiv h_\alpha^\beta q_{;\beta}^\alpha$, etc. The quantity $\sigma_{\alpha\beta}$ is the shear tensor

$$\sigma_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left(\nabla_\alpha u_\beta + \nabla_\beta u_\alpha - \frac{2}{3} h_{\alpha\beta} \Theta \right) \quad (9)$$

and $\omega_{\alpha\beta}$ is the vorticity tensor

$$\omega_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (\nabla_\alpha u_\beta - \nabla_\beta u_\alpha). \quad (10)$$

The energy conservation (7) is the result of the projection $u_\alpha T^{\alpha\beta}_{;\beta} = 0$ of $T^{\alpha\beta}_{;\beta} = 0$ while the momentum conservation (8) follows from the orthogonal projection $h_{\alpha\mu} T^{\mu\beta}_{;\beta} = 0$. We assume equations of state of the general form

$$p = p(n, T), \quad \rho = \rho(n, T), \quad (11)$$

i.e., we will use the particle number density n and the temperature T as independent thermodynamical variables. Within the MIS theory the thermodynamic "fluxes" π , q_α and $\pi_{\alpha\beta}$ obey the following evolution equations, in which, for simplicity, we have neglected the couplings between heat flux and viscous pressures [1]:

$$\pi = -\zeta \left[\Theta + \beta_0 \dot{\pi} + \frac{\pi}{2} T \left(\frac{\beta_0}{T} u^\gamma \right)_{;\gamma} \right], \quad (12)$$

$$q^\alpha = -\lambda h^{\alpha\beta} \left[\nabla_\beta T + T \dot{u}_\beta + T \beta_1 \dot{q}_\beta + \frac{T^2}{2} q_\beta \left(\frac{\beta_1}{T} u^\gamma \right)_{;\gamma} \right], \quad (13)$$

and

$$\pi^{\alpha\beta} = -2\eta h^{\alpha\mu} h^{\beta\nu} \left[\sigma_{\mu\nu} + \beta_2 \dot{\pi}_{\mu\nu} + \frac{\pi_{\mu\nu}}{2} \left(\frac{\beta_2}{T} u^\gamma \right)_{;\gamma} \right]. \quad (14)$$

The symbols ζ , λ and η denote the (positive) coefficients of bulk viscosity, heat conductivity and shear viscosity, respectively. Additionally, the second-order theory is characterized by the (positive) coefficients β_0 , β_1 and β_2 . These coefficients appear in terms with time derivatives of π , q_α and $\pi_{\alpha\beta}$, respectively. The appearance of time derivatives of π , q_α and $\pi_{\alpha\beta}$ makes the relations (12) - (14) evolution equations which ensure that the entropy production is non-negative [1]. The Eckart case corresponds to $\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$, which cancels these time derivatives and reduces the set (12) - (14) to algebraic equations.

3 Linearization procedure

3.1 Background

In a first step we specify the relations of the previous chapter to a homogeneous, isotropic perfect fluid at rest in Minkowski space. The corresponding quantities are denoted by an overbar. We have

$$\bar{u}^0 = 1, \bar{u}_0 = -1, \bar{u}^a = \bar{u}_a = 0, \quad (15)$$

(latin indices run over 1,2,3) and

$$\bar{\Theta} = \nabla_\alpha \bar{T} = \bar{\sigma}_{\alpha\beta} = \bar{u}_\alpha = \bar{\pi} = \bar{\pi}^{\alpha\beta} = \bar{q}^\alpha = 0. \quad (16)$$

It follows that

$$\bar{n} = \text{const}, \bar{T} = \text{const}, \bar{\rho} = \text{const}, \bar{p} = \text{const}. \quad (17)$$

3.2 First-order perturbations

Now we consider perturbations of all the thermodynamic quantities, denoted by a hat symbol:

$$n = \bar{n} + \hat{n}, \quad T = \bar{T} + \hat{T}, \quad (18)$$

$$\rho = \bar{\rho} + \hat{\rho}, \quad p = \bar{p} + \hat{p}.$$

"First order" here means always linear in \hat{n} , \hat{T} , $\hat{\rho}$ and \hat{p} . Perturbing also the relation $\eta_{\mu\nu} u^\mu u^\nu = -1$ yields at linear order,

$$\eta_{\mu\nu} \hat{u}^\mu \bar{u}^\nu = 0 \quad \Rightarrow \quad \hat{u}^0 = \hat{u}_0 = 0. \quad (19)$$

For the perturbed spatial components of the four-velocity we have $\hat{u}^m = \hat{u}_m$ and the first-order expansion scalar is

$$\hat{\Theta} = \hat{u}^m_{;m}. \quad (20)$$

For the first-order perturbations of the acceleration we find

$$\begin{aligned} (\dot{u}_\mu)^\wedge &= \hat{u}_{\mu,\nu} u^\nu + u_{\mu,\nu} \hat{u}^\nu \quad \Rightarrow \\ (\dot{u}_0)^\wedge &= 0, \quad (\dot{u}_{m,m})^\wedge = \hat{\Theta}. \end{aligned} \quad (21)$$

Furthermore, we have at first order

$$h_0^\alpha \dot{q}_\alpha = 0, \quad h_m^\alpha \dot{q}_\alpha = \dot{q}_m. \quad (22)$$

The terms $\dot{u}_\alpha q^\alpha$, $\sigma_{\alpha\beta} \pi^{\alpha\beta}$, $\pi \dot{u}_\mu$, $\dot{u}^\beta \pi_{\alpha\beta}$ and $[\omega_{\alpha\beta} + \sigma_{\alpha\beta} + \frac{4}{3} \Theta h_{\alpha\beta}] q^\beta$ are of second order and will be omitted in the following.

3.3 First-order conservation equations

The linearized set of equations becomes (now we omit the overbars for the background variables)

$$\dot{\hat{n}} + n \hat{\Theta} = 0, \quad (23)$$

$$\dot{\hat{\rho}} + (\rho + p) \hat{\Theta} + q_{a,a} = 0, \quad (24)$$

and

$$(\rho + p) (\dot{u}_m)^\wedge + \hat{p}_{;m} + \pi_{;m} + \pi_{ma,a} + \dot{q}_m = 0. \quad (25)$$

Taking the spatial divergence of Eq. (25) and applying the last of the relations (21), we get

$$(\rho + p) \dot{\hat{\Theta}} + \Delta \hat{p} + \Delta \pi + \pi_{ma,ma} + \dot{q}_{m,m} = 0, \quad (26)$$

where Δ is the three-dimensional Laplacian. By using (26) together with (23) and (24) we shall obtain the longitudinal modes. The transverse modes will be found by taking the spatial rotation of (25):

$$2(\rho + p) \dot{w}_a + \varepsilon_{amn} (\pi_{mb,bm} + \dot{q}_{m,n}) = 0, \quad (27)$$

where

$$w_a \equiv \frac{1}{2} \varepsilon_{amn} \hat{u}_{m,n} \quad (28)$$

and ε_{amn} is the three-dimensional Levi-Civita symbol.

These are the basic equations from which we shall derive the explicit mode structure in the following section.

4 Mode structure

4.1 Longitudinal modes

For the dissipative terms in (24) and (26) we find up to linear order

$$\Delta\pi = -\zeta \left[\Delta\hat{\Theta} + \beta_0 \Delta\hat{\pi} \right], \quad (29)$$

$$q_{a,a} = -\lambda T \left[\frac{\Delta T}{T} + \dot{\hat{\Theta}} + \beta_1 \dot{q}_{a,a} \right], \quad (30)$$

and

$$\pi_{ma,ma} = -2\eta \left[\frac{2}{3} \Delta\hat{\Theta} + \beta_2 \dot{\pi}_{ma,ma} \right], \quad (31)$$

respectively. The divergence terms in (12)-(14) are of second order and do not contribute in (29)-(31). In (31) we have used that at first order

$$\sigma_{00} = \sigma_{0b} = \sigma_{b0} = 0, \quad (32)$$

and

$$\sigma_{ab,ab} = \frac{2}{3} \Delta\hat{\Theta}. \quad (33)$$

Upon using the equations of state (11) we may replace $\dot{\hat{\rho}}$ by

$$\dot{\hat{\rho}} = \left(\rho + p - T \frac{\partial p}{\partial T} \right) \frac{\dot{\hat{n}}}{n} + \frac{\partial p}{\partial T} \dot{\hat{T}} \quad (34)$$

and $\Delta\hat{p}$ by

$$\Delta\hat{p} = \frac{\partial p}{\partial n} \Delta\hat{n} + \frac{\partial p}{\partial T} \Delta\hat{T}. \quad (35)$$

To obtain (34) we have used the thermodynamic relation

$$\frac{\partial \rho}{\partial n} = \frac{\rho + p}{n} - \frac{T}{n} \frac{\partial p}{\partial T}, \quad (36)$$

which guarantees that the entropy s per particle, defined by

$$s = \frac{\rho + p}{nT} - \frac{\mu}{T}, \quad (37)$$

where μ is the chemical potential, is a state function. Eq. (36) then follows from the requirement that the second derivatives of s with respect to the basic thermodynamical variables be interchangeable:

$$\frac{\partial^2 s}{\partial n \partial T} = \frac{\partial^2 s}{\partial T \partial n}. \quad (38)$$

The set of independent variables consists of \hat{n} , \hat{T} , and $\hat{\Theta}$ as well as of π , q_a , and π_{ma} . Now we look for plane-wave solutions

$$\hat{n}, \hat{T}, \hat{\Theta}, \dots \propto \exp[i(\omega t - k_a x^a)]. \quad (39)$$

From the perturbed particle number conservation equation (23) we find

$$\hat{\Theta} = -i\omega \frac{\hat{n}}{n}. \quad (40)$$

Since $\hat{\Theta}$ may always be eliminated with the help of the last relation, we will end up with a system for \hat{n} and \hat{T} . The energy conservation (24) with (23), (34) and (40) then becomes

$$-i\omega T \frac{\partial p}{\partial T} \frac{\hat{n}}{n} + i\omega \hat{T} \frac{\partial \rho}{\partial T} - ik_a q_a = 0, \quad (41)$$

while the momentum conservation (26) with (35), (40) and $\dot{\hat{\Theta}} \rightarrow i\omega \hat{\Theta} = \omega^2 \hat{n}/n$ is

$$\left[(\rho + p) \omega^2 - k^2 n \frac{\partial p}{\partial n} \right] \frac{\hat{n}}{n} - k^2 T \frac{\partial p}{\partial T} \frac{\hat{T}}{T} - k^2 \pi - k_m k_a \pi_{ma} - i\omega i k_m q_m = 0, \quad (42)$$

where $k^2 \equiv k_a k^a$. For the dissipative quantities we find from (29)-(31)

$$-k^2 \pi = -i\omega \frac{\zeta k^2}{1 + i\omega \zeta \beta_0} \frac{\hat{n}}{n}, \quad (43)$$

$$-ik_a q_a = -\frac{\lambda T}{1 + i\omega \lambda T \beta_1} \left[-k^2 \frac{\hat{T}}{T} + \omega^2 \frac{\hat{n}}{n} \right], \quad (44)$$

and

$$-k_a k_b \pi_{ab} = -\frac{4}{3} i\omega k^2 \frac{\eta}{1 + 2i\omega \eta \beta_2} \frac{\hat{n}}{n}. \quad (45)$$

With the help of the definitions

$$\zeta_\beta \equiv \frac{\zeta}{1 + i\omega \zeta \beta_0}, \quad (46)$$

$$\lambda_\beta \equiv \frac{\lambda}{1 + i\omega \lambda T \beta_1}, \quad (47)$$

$$\eta_\beta \equiv \frac{\eta}{1 + 2i\omega \eta \beta_2}, \quad (48)$$

we may write

$$-k^2 \pi = -i\omega k^2 \zeta_\beta \frac{\hat{n}}{n}, \quad (49)$$

$$-ik_a q_a = -\lambda_\beta T \left[-k^2 \frac{\hat{T}}{T} + \omega^2 \frac{\hat{n}}{n} \right], \quad (50)$$

and

$$-k_a k_b \pi_{ab} = -\frac{4}{3} i\omega k^2 \eta_\beta \frac{\hat{n}}{n}, \quad (51)$$

respectively. The definitions (46)-(48) were chosen such that formally the structures (49)-(51)

are those of the Eckart theory. This will allow us to treat the first- and second-order theories in parallel.

Combining the conservation equations (41) and (42) with (49)-(51), our system reduces to

$$\left[\omega T \frac{\partial p}{\partial T} - i\omega^2 \lambda_\beta T \right] \frac{\hat{n}}{n} + \left[-\omega T \frac{\partial \rho}{\partial T} + ik^2 \lambda_\beta T \right] \frac{\hat{T}}{T} = 0 \quad (52)$$

and

$$\left[\omega^2 - \frac{n}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial n} k^2 - i\omega k^2 \left(\frac{\frac{4}{3}\eta_\beta + \zeta_\beta}{\rho+p} \right) - i\omega^3 \frac{\lambda_\beta T}{\rho+p} \right] \frac{\hat{n}}{n} + \left[-\frac{T}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial T} k^2 + i\omega k^2 \frac{\lambda_\beta T}{\rho+p} \right] \frac{\hat{T}}{T} = 0, \quad (53)$$

respectively. The set of equations (52) and (53) describes first-order perturbations within the MIS theory where the coupling between heat flux and viscous pressures was neglected. The corresponding perturbations of the Eckart theory follow for $\zeta_\beta \rightarrow \zeta$, $\lambda_\beta \rightarrow \lambda$, and $\eta_\beta \rightarrow \eta$. Notice that ζ_β , λ_β , and η_β depend on ω .

The system (52) and (53) provides us with the relation

$$\left[\omega^2 \frac{n}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial n} k^2 - i\omega k^2 \left(\frac{\frac{4}{3}\eta_\beta + \zeta_\beta}{\rho+p} \right) - i\omega^3 \frac{\lambda_\beta T}{\rho+p} \right] \times \left[-\omega T \frac{\partial \rho}{\partial T} + ik^2 \lambda_\beta T \right] - \left[-\frac{T}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial T} k^2 + i\omega k^2 \frac{\lambda_\beta T}{\rho+p} \right] \left[\omega T \frac{\partial p}{\partial T} - i\omega^2 \lambda_\beta T \right] = 0. \quad (54)$$

By multiplying this equation by $-(T\partial\rho/\partial T)^{-1}$ and introducing the square of the sound velocity c_s^2 by

$$c_s^2 \equiv \frac{n}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{T}{\rho+p} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)^2, \quad (55)$$

we obtain the dispersion relation

$$\begin{aligned} & -i\omega^4 \frac{\lambda_\beta T}{\rho+p} + \omega^3 - \omega k^2 c_s^2 - i\omega^2 k^2 \frac{\frac{4}{3}\eta_\beta + \zeta_\beta}{\rho+p} \\ & - i\omega^2 k^2 \lambda_\beta T \left[\frac{1}{T \frac{\partial \rho}{\partial T}} - \frac{2}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial T} \right] \\ & + ik^4 \lambda_\beta \frac{n}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial n} = 0. \quad (56) \end{aligned}$$

We have neglected here products of dissipative quantities. It is obvious that the perfect-fluid limit is

$$\omega^2 = c_s^2 k^2, \quad (\zeta = \lambda = \eta = 0). \quad (57)$$

With the help of the definitions (46), (47), and (48) for ζ_β , λ_β , and η_β , respectively and neglecting higher-order terms in ζ , λ , and η , we may write (56) as

$$\begin{aligned} & -i\omega^4 \frac{\lambda T}{\rho+p} + (\omega^3 - \omega k^2 c_s^2) \left[(1 + i\omega \zeta \beta_0) \right. \\ & \times (1 + i\omega \lambda T \beta_1) (1 + 2i\omega \eta \beta_2) \left. \right] - i\omega^2 k^2 \frac{\frac{4}{3}\eta + \zeta}{\rho+p} \\ & - i\omega^2 k^2 \lambda T \left[\frac{1}{T \frac{\partial \rho}{\partial T}} - \frac{2}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial T} \right] \\ & + ik^4 \lambda \frac{n}{\rho+p} \frac{\partial p}{\partial n} = 0. \quad (58) \end{aligned}$$

Let us now look at the long-wavelength limit $k \rightarrow 0$. We obtain

$$\begin{aligned} & -i\omega^4 \frac{\lambda T}{\rho+p} + \omega^3 \left[(1 + i\omega \zeta \beta_0) (1 + i\omega \lambda T \beta_1) \right. \\ & \times (1 + 2i\omega \eta \beta_2) \left. \right] = 0, \quad (k \rightarrow 0). \quad (59) \end{aligned}$$

The last relation allows us to point out the different stability behavior of the MIS theory compared with Eckart's theory. Besides of the always existing threefold solution $\omega = 0$ we have, in the Eckart case $\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = 0$, the solution

$$i\omega_{L_E} = \frac{\rho+p}{\lambda T}. \quad (60)$$

As long as the right-hand side of (60) is positive, this means an imaginary frequency which, according to (39), describes an exponential instability on extremely short timescales which are much below any hydrodynamic scale [2].

It is obvious, how the situation changes in the MIS theory, where we find, besides of $\omega = 0$ (threefold)

$$i\omega_{L_0} = -\frac{1}{\beta_0 \zeta}, \quad (61)$$

$$i\omega_{L_1} = -\frac{\rho+p}{\lambda T [\beta_1 (\rho+p) - 1]}, \quad (62)$$

$$i\omega_{L_2} = -\frac{1}{2\beta_2 \eta}, \quad (63)$$

instead of (60). Since $\beta_1 (\rho+p) > 1$ (see formula (134) in [1]), we conclude, that none of these modes is unstable. While there is no counterpart of

the modes (61) and (63) in the Eckart theory, the unstable mode (60) of the latter becomes stable according to (62). (For comparison: The modes (61)-(63) are (37)-(39) in [3]).

All the modes (60)-(63) describe perturbations which are far away from the perfect fluid behaviour (57). In fact, in obtaining (59) by formally putting $k = 0$ in (58), one considers the dissipative terms retained in (59) to be of higher order than the perfect fluid contribution which leads to $c_s^2 k^2$ in (57). These modes do not respect the requirement that dissipative terms should provide small correction to the perfect-fluid behavior. The modes (61)-(63) are strongly damped on time scales much smaller than any hydrodynamic time scale.

Next we study the dispersion relation for small but finite values of k . Up to linear order in the transport coefficients, Eq. (58) is equivalent to

$$i\omega^4 \left[\frac{\lambda T}{\rho + p} (\beta_1 (\rho + p) - 1) + \beta_0 \zeta + 2\beta_2 \eta \right] + \omega^3 + \omega k^2 c_s^2 - \frac{i\omega^2 k^2}{\rho + p} \left[\left(\frac{4}{3} + 2c_s^2 \beta_2 (\rho + p) \right) \eta + (1 + \beta_0 (\rho + p)) \zeta + ik^4 \lambda \frac{n}{\rho + p} \frac{\partial p}{\partial n} \right] + \lambda T \left(\beta_1 c_s^2 (\rho + p) + \frac{\rho + p}{T} \frac{\partial \rho}{\partial T} - 2 \frac{\partial p}{\partial T} \right) = 0. \quad (64)$$

We are now interested in the solutions $\omega = \omega(k)$ for small values of k about the mentioned three-fold solution $\omega = 0$. To this purpose we expand the dispersion relation (64) about $\omega = 0$ according to

$$\omega = a_L k + b_L k^2 + \dots \quad (65)$$

and compare different orders of k separately. At lowest order which is k^3 we find

$$a_{L1} = c_s, \quad (66)$$

$$a_{L2} = -c_s, \quad (67)$$

$$a_{L3} = 0. \quad (68)$$

The k^4 -order terms provide us with

$$b_{L1,2} = \frac{i}{2} \left[\frac{\frac{4}{3}\eta + \zeta}{\rho + p} + \frac{\lambda T}{nT} \left(\frac{1}{c_v} - \frac{1}{c_p} \right) + \frac{1}{\rho + p} \left(c_s^2 - 2 \frac{\partial p}{\partial T} \right) \right], \quad (69)$$

$$b_{L3} = \frac{i\lambda}{nc_p}, \quad (70)$$

where

$$c_v \equiv \frac{1}{n} \frac{\partial \rho}{\partial T}, \quad c_p \equiv c_v \frac{\rho + p}{n} \frac{\partial p}{\partial n} c_s^2. \quad (71)$$

It is remarkable that all the quantities β_0 , β_1 and β_2 cancel and do *not* influence the modes up to the order k^2 . (This property is mentioned in [3] following formula (40). The modes (65) with (66)-(70) exactly coincide with those of the Eckart theory. They were first derived by Weinberg [20] and also in [21]). The coefficients (69) describe a damping of the propagating (with the sound velocities (66) and (67)) modes, while the third mode, characterized by (68) and (70) is simply overdamped. These modes characterize perturbations which are close to the perfect fluid behaviour. The dissipative terms describe small deviations from equilibrium.

4.2 Transverse modes

Using (13) and (14) we find for the dissipative terms in (27) up to linear order

$$\varepsilon_{amn} \dot{q}_{m,n} = -\lambda T [2\ddot{w}_a + \beta_1 \varepsilon_{amn} \ddot{q}_{m,n}] \quad (72)$$

and

$$\varepsilon_{amn} \pi_{mp,pn} = -2\eta [\Delta w_a + \beta_2 \varepsilon_{amn} \dot{\pi}_{mp,pn}]. \quad (73)$$

For plane-wave solution of the type (39), Eq. (27) becomes

$$2i\omega (\rho + p) w_a - k_p k_n \varepsilon_{amn} \pi_{mp} + i\omega (-ik_n) \varepsilon_{amn} q_m = 0, \quad (74)$$

while the relations (72) and (73) transform into

$$i\omega (-ik_n) \varepsilon_{amn} q_m = 2\lambda_\beta T \omega^2 w_a \quad (75)$$

and

$$-k_n k_b \varepsilon_{amn} \pi_{mb} = 2\eta_\beta k^2 w_a, \quad (76)$$

respectively, where λ_β is given by (47) and η_β by (48). Use of (75) and (76) in (74) provides us with the dispersion relation

$$i\omega (\rho + p) + \eta_\beta k^2 + \lambda_\beta T \omega^2 = 0, \quad (77)$$

which for $\eta_\beta \rightarrow \eta$ and $\lambda_\beta \rightarrow \lambda$ coincides with the corresponding relation of Eckart's theory. We investigate the dispersion relation (77) analogously to its counterpart (56) for longitudinal modes.

For $k \rightarrow 0$ we obtain, up to linear order in the dissipative terms,

$$i\omega \left[1 + i\omega \frac{\lambda T}{\rho + p} (\beta_1 (\rho + p) - 1) \right] \times [1 + 2i\omega\eta\beta_2] = 0, \quad (k \rightarrow 0). \quad (78)$$

For the Eckart theory ($\beta_1 = \beta_2 = 0$) we obtain $\omega = 0$ and

$$i\omega_{T_E} = \frac{\rho + p}{\lambda T}, \quad (79)$$

i.e., the same short-time instability as in the longitudinal case (cf. Eq. (60)). For nonvanishing values of β_1 and β_2 we find, except of the solution $\omega = 0$,

$$i\omega_{T_1} = -\frac{\rho + p}{\lambda T} \frac{1}{\beta_1 (\rho + p) - 1} \quad (80)$$

and

$$i\omega_{T_2} = -\frac{1}{2\beta_2\eta}. \quad (81)$$

All the comments following Eq. (63) apply here also. In particular, the instability of the Eckart theory is removed here as well for $\beta_1 (\rho + p) > 1$. The modes (80) and (81) describe a damping on extremely short time-scales. For comparison, (80) corresponds to (35) in [3] while (81) corresponds to (34) in [3].

The solutions $\omega = \omega(k)$ for small vales of k about $\omega = 0$ are again found by an ansatz of the type (65),

$$\omega = a_T k + b_T k^2 + \dots \quad (82)$$

Using this ansatz in (77) and comparing terms of linear order in k we find

$$a_T = 0, \quad (83)$$

while the order k^2 yields

$$b_T = -i \frac{\eta}{\rho + p}. \quad (84)$$

This is exactly the nonpropagating, transverse shear mode of the first-order theory. Consequently, neither the longitudinal nor the transverse modes are influenced by the quantities β_0 , β_1 and β_2 in linear and in quadratic orders in k .

5 Conclusion

With (61)-(63) and (65)-(70) for the longitudinal case, as well as with (80) - (84) for the transverse one, we have obtained a comprehensive picture of the hydrodynamic modes in a dissipative fluid in the long-wavelength limit. We have clarified the relationship between the mode structures of the MIS and the Eckart theories. None of the results here is new. But I hope this specific pedagogically motivated presentation may be helpful for a better physical understanding and, possibly, may also be useful as a starting point and reference for further investigations in dissipative relativistic fluid dynamics.

Sobre o autor

Winfried Zimdahl (winfried.zimdahl@gmail.com) é pesquisador do Núcleo Cosmo-ufes e um dos fundadores do PPGCosmo. Doutorou-se pela Universidade de Rostock, Alemanha, em 1975, com uma tese sobre física estatística. Autor de quase cem artigos científicos, foi citado recentemente na lista dos pesquisadores mais influentes do mundo, elaborada pela Universidade de Stanford (EUA). Desenvolve pesquisas em cosmologia e gravitação, com especial ênfase nos estudos do setor escuro do universo. Orientou mais de uma dezena de estudantes de mestrado e doutorado.

Referências

- [1] W. A. Hiscock e L. Lindblom, *Stability and causality in dissipative relativistic fluids*, *Annals of Physics* **151**(2), 466 (1983).
- [2] W. A. Hiscock e L. Lindblom, *Generic instabilities in first-order dissipative relativistic fluid theories*, *Phys. Rev. D* **31**, 725 (1985).
- [3] W. A. Hiscock e L. Lindblom, *Linear plane waves in dissipative relativistic fluids*, *Phys. Rev. D* **35**, 3723 (1987).
- [4] C. Eckart, *The thermodynamics of irreversible processes. iii. relativistic theory of the simple fluid*, *Phys. Rev.* **58**, 919 (1940).
- [5] L. Landau e E. Lifshitz, *Fluid Mechanics* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1958).

- [6] I. Müller, *Zum Paradoxon der Wärmeleitungstheorie*, *Zeitschrift für Physik* **198**(4), 329 (1967).
- [7] W. Israel, *Nonstationary irreversible thermodynamics: A causal relativistic theory*, *Annals of Physics* **100**(1), 310 (1976).
- [8] W. Israel e J. M. Stewart, *Transient relativistic thermodynamics and kinetic theory*, *Annals of Physics* **118**(2), 341 (1979).
- [9] J. M. Stewart e S. W. Hawking, *On transient relativistic thermodynamics and kinetic theory*, *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* **357**(1688), 59 (1977).
- [10] D. Pavón, D. Jou e J. Casas-Vázquez, *On a covariant description of dissipative phenomena.*, *Ann. Inst. Henri Poincaré* **36**(79) (1982).
- [11] V. Belinskii, E. Nikomarov e I. Khalatnikov, *Investigation of the cosmological evolution of viscoelastic matter with causal thermodynamics*, *Journal of Experimental and Theoretical Physics* **50**(2), 417 (1979).
- [12] D. Pavon, J. Bafaluy e D. Jou, *Causal Friedmann-Robertson-Walker cosmology*, *Classical and Quantum Gravity* **8**, 347 (1999).
- [13] L. P. Chimento e A. S. Jakubi, *Cosmological solutions of the Einstein equations with a causal viscous fluid*, *Classical and Quantum Gravity* **10**(10), 2047 (1993).
- [14] M. Zakari e D. Jou, *Equations of state and transport equations in viscous cosmological models*, *Phys. Rev. D* **48**, 1597 (1993).
- [15] R. Maartens, *Causal thermodynamics in relativity* (1996). [ArXiv:astro-ph/9609119](#).
- [16] W. Zimdahl, D. Pavón e R. Maartens, *Reheating and causal thermodynamics*, *Phys. Rev. D* **55**, 4681 (1997). [ArXiv:astro-ph/9611147](#).
- [17] M. K. Mak e T. Harko, *Full causal bulk-viscous cosmological models*, *Journal of Mathematical Physics* **39**(10), 5458 (1998).
- [18] W. Zimdahl, *Cosmological particle production, causal thermodynamics, and inflationary expansion*, *Phys. Rev. D* **61**, 083511 (2000).
- [19] O. F. Piattella, J. C. Fabris e W. Zimdahl, *Bulk viscous cosmology with causal transport theory*, *JCAP* **05**, 029 (2011). [ArXiv:1103.1328](#).
- [20] S. Weinberg, *Entropy Generation and the Survival of Protogalaxies in an Expanding Universe*, *Astrophysical Journal* **168**, 175 (1971).
- [21] J. Guichelaar, W. Van Leeuwen e S. de Groot, *On relativistic kinetic gas theory: VII. The propagation and absorption of sound*, *Physica* **59**(1), 97 (1972).

Uma proposta de introdução à astrofotografia

Leopoldo Gorges Neto, Eduardo Paganelli, Egon Henrique Dums e Luiz Fernando Macedo Morescki Junior

Instituto Federal de Santa Catarina

Resumo

Neste trabalho, apresentamos uma proposta de introdução à astrofotografia planetária que foi desenvolvida no projeto de extensão “Astronoifsc” do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul – Centro. A proposta foi separada em duas etapas: i) acoplamento do instrumento fotográfico no telescópio e ii) processamento das imagens. Para a obtenção das imagens, utilizamos um aparelho celular e uma *webcam*, onde relatamos as particularidades na construção do suporte para seus respectivos acoplamentos. Apresentamos os resultados que obtivemos de Júpiter e Saturno, discutindo algumas de suas características visíveis nas fotografias e a potencialidade da astrofotografia na divulgação científica, através de transmissões ao vivo que podem beneficiar a popularização da astronomia, e nas aulas de ciências.

Abstract

In this work, we present a proposal to introduce planetary astrophotography that was developed in the extension project “Astronoifsc” of the Federal Institute of Education, Science and Technology of Santa Catarina, Campus Jaraguá do Sul – Centro. The proposal was separated into two steps: i) coupling the photographic instrument to the telescope and ii) image processing. To obtain the images, we used a cell phone and a webcam, where we report the particularities in the construction of the support for their respective couplings. We present the results we obtained from Jupiter and Saturn, discussing some of their visible characteristics in photographs and the potential of astrophotography in scientific dissemination, through live broadcasts that can benefit the popularization of astronomy, and in science classes.

Palavras-chave: ensino de astronomia, astrofotografia, popularização da astronomia, divulgação científica.

Keywords: astronomy teaching, astrophotography, popularization of astronomy, scientific dissemination.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.36834](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.36834)

1 Introdução

Houve uma época em que os eventos que proporcionavam as mais genuínas e aprazíveis emoções ficavam presos na memória das pessoas, limitando estas experiências às lembranças de quem teve a oportunidade de presenciá-los. Atualmente, dispomos de aparelhos que possuem a capacidade de registrar estes momentos e que funcionam como uma exposição daquela memória, nos auxiliando ao transpormos a outras pessoas uma história que gostamos de ter vivido. A emoção de ver a Lua e planetas por um telescópio é única para cada indivíduo, porém, com o tempo, notamos um padrão no semblante destas pessoas: uma constatação de uma realidade até então abscondida. Assim, muitas destas pessoas têm o ensejo de fotografar e/ou filmar este momento para mostrar esta experiência aos seus amigos e familiares,

seja pessoalmente ou através de suas redes sociais.

O aparelho celular é o recurso mais próximo de boa parte da população que permite isso. Contudo, a depender do que se é observado e também da ocular que está sendo utilizada no telescópio, este registro pode ser prejudicado devido às trepidações no ambiente e também as oscilações na atmosfera. Uma alternativa amplamente utilizada por astrônomos amadores [1] é o acoplamento de uma *webcam* no lugar de uma ocular, a exemplo do que é feito com câmeras profissionais. Esta técnica tem se demonstrado muito eficiente, pois permite não apenas a captura de imagens com boa resolução, mas também a filmagem do objeto observado.

O presente trabalho é produto de um projeto de extensão desenvolvido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Cata-

rina, Campus Jaraguá do Sul - Centro e que buscou divulgar a astronomia à comunidade através de exposições das astrofotografias obtidas pelos integrantes deste projeto. Visando contribuir com a popularização da astronomia, relatamos neste trabalho a metodologia de instrumentação necessária para a astrofotografia e também para o processamento de imagens planetárias que empregamos neste projeto, onde utilizamos quatro *softwares*: Sharpcapture, Castrator, Autostakert e Registax, todos de livre acesso. Ao final, apresentamos os resultados obtidos com Júpiter e Saturno utilizando uma *webcam* e um celular.

2 Materiais e métodos

O procedimento aqui descrito pode ser realizado com qualquer aparelho celular ou *webcam*. Entretanto, algumas especificações do fabricante podem indicar a qualidade das fotografias ao final do processamento. Em ambos os casos, deve-se estar atento às dimensões do sensor digital ou à resolução da câmera.

Para o aparelho celular, a técnica de gravação é chamada de afocal e funciona através da projeção da luz do corpo celeste observado pela ocular do telescópio. Isto é, dispondo do telescópio com a ocular desejada para a observação, basta aproximar a câmera do celular na ocular do telescópio que a gravação já será possível, salvo instabilidades de posição. Para a *webcam*, é preciso remover sua lente e após o acoplamento no telescópio, a lente ou espelho do mesmo servirá de lente focalizadora da luz proveniente do objeto a ser observado, não necessitando assim, da ocular. Esta técnica é chamada de focal e é semelhante ao acoplamento das câmeras fotográficas profissionais [2].

O princípio de funcionamento de um CCD (Dispositivo de Carga Acoplada), amplamente encontrado em *webcams* e câmeras profissionais, é a conversão da luz em cargas elétricas. Em cada pixel está presente um fotodiodo que é responsável por liberar elétrons de acordo com o fluxo de luz, ou fótons incidentes. Estes, passam então para um conversor analógico-digital que analisa e associa um número de sistema binário a este pixel [3].

Por facilidade no tratamento das imagens planetárias, é preferível que o sensor digital possa produzir imagens coloridas. Para isto,

[...] os pixels do seu CCD devem ter algum tipo de filtragem, o que significa selecionar a luz proveniente da cena fotografada e atribuir valores maiores as cores mais intensas presentes. O sistema mais empregado é o CCD de matriz RGB, isto é, os pixels apresentam filtros nas cores vermelho (R), verde (G) e azul (B) e atuam de forma seletiva para estas cores [3].

Grande parte das *webcams* encontradas no mercado já possuem este tipo de filtragem, apenas basta evidenciar se esta é uma câmera colorida. A resolução da *webcam* a ser escolhida é outro fator importante a ser discutido:

a fotografia de planetas, tal como alguns aspectos da fotografia solar e lunar, pode ser considerada como fotografia de alta resolução e constitui um domínio relativamente especializado e exigente da fotografia astronômica. A fotografia de alta resolução está relacionada com a obtenção de imagens planetárias, lunares e solares com um pormenor considerável, isto é, próximo do limite de resolução do instrumento utilizado [4].

O produto da quantidade de pixels presentes em um sensor digital da fileira horizontal com a fileira vertical é o que define a resolução da câmera. Por exemplo, uma câmera com resolução de 16 megapixel (Mp) pode ser entendida como o produto de 4000 pixels por 4000 pixels. Contudo, é relevante mencionar que a maioria das câmeras possuem uma resolução variável, este valor apresentado pelo fabricante diz respeito a maior resolução possível [2]. Ainda, é de referir que os aparelhos celulares com câmera possuem, em sua grande maioria, o sensor digital tipo CMOS, que pode ser entendido como um sucessor do CCD. A diferença fundamental entre estes dois sensores é que o primeiro realiza o trabalho de conversão digital antes mesmo de enviar ao processador da câmera [5].

2.1 Acoplamento do instrumento fotográfico no telescópio

Utilizamos neste trabalho o aparelho celular de um dos integrantes deste projeto de extensão, cuja resolução da câmera é de 8Mp e adquirimos a *webcam* com resolução de 1280x720, também conhecido como 720p, em uma loja física em nossa cidade. Para o celular, desenvolvemos um suporte para melhorar a estabilidade da gravação, como pode ser visto na Figura 1.

Este suporte foi construído com peças de um mini tripé para celular, especialmente a região



Figura 1: Suporte para celular.

que prende o celular. Foi inserido uma braçadeira de plástico que serviu de acoplamento deste suporte na ocular do telescópio e possibilitou um alinhamento mais prático da ocular com a câmera. Na Figura 2, apresentamos o suporte com o celular acoplado no telescópio.

Com o aparelho celular nesta disposição, é possível realizar gravações e fotografias com a precisão que a estabilidade do equipamento proporciona. Para a *webcam*, como já comentado, é necessário remover sua lente (que normalmente é rosqueada e de fácil retiro) e retirar a ocular do telescópio. Para garantir o seu acoplamento no telescópio, foi anexado com cola quente um pedaço de cano de 32 mm de diâmetro, garantindo a centralidade da CCD, como mostra a Figura 3. Ainda, o cano foi pintado de preto para diminuir reflexões indesejáveis que podem prejudicar a fotografia ou filmagem.

Em alguns casos, pode ser necessário lixar este cano para o encaixe no telescópio. A Figura 4 mostra a *webcam* acoplada no telescópio.

Com a metodologia empregada neste trabalho, podemos utilizar tanto o aparelho celular quanto a *webcam*. Na sequência, apresentamos as eta-



Figura 2: Celular acoplado no telescópio



Figura 3: Webcam utilizada e sua CCD centralizada

pas metodológicas para o processamento das imagens, onde, ao final, comparamos as imagens obtidas pela *webcam* e pelo celular utilizando um telescópio refletor Toya que possui um espelho de 150 mm de diâmetro e acompanhamento remoto. No entanto, esta metodologia pode ser aplicada para telescópios convencionais que não possuem acompanhamento remoto, onde o operador do telescópio pode compensar o movimento aparente do objeto observado buscando deixá-lo no centro da imagem produzida. Os pequenos erros de deslocamento serão corrigidos por um dos *softwares* apresentado na sequência.



Figura 4: Webcam acoplada no telescópio

2.2 Processamento das imagens

Serão relatadas nesta subseção a utilização de quatro *softwares* para o processamento das imagens. A metodologia que será comentada na sequência utiliza da filmagem do objeto observado, sendo possível capturar imagens da Lua, do Sol (com o devido filtro) e dos Planetas. Desta maneira, o primeiro *software* aplica-se apenas à *webcam*, pois o vídeo produzido pelo celular pode ser diretamente aplicado no segundo *software*, como veremos. Após o acoplamento da *webcam* no telescópio, pode-se iniciar a captura de imagens com um *software* de preferência. O Sharpcapture versão 3.2 mostrou-se eficiente para o nosso objetivo devido a sua simplicidade na interface, embora existam outros *softwares* como o FireCapture, que tem tido um retorno bastante positivo nos fóruns de astronomia amadora. Ambos os *softwares* são destinados à astrofotografia e são livres para Windows 10 e outros sistemas operacionais menos populares.

Devido essencialmente à poluição luminosa e à perturbação atmosférica, o fluxo de fótons pode variar sua posição na CCD. Desta forma, o Sharp-

capture realiza um vídeo da imagem desejada, onde podemos especificar o tempo limite ou a quantidade de frames pretendida.

Uma vez conectada a *webcam* ao notebook, podemos abrir o Sharpcap e selecionar a câmera a ser utilizada na opção “câmeras”. As configurações dispostas ao lado direito da tela dependerão da câmera a ser utilizada, como mostra a Figura 5.

Podemos então direcionar o telescópio ao objeto pretendido e aumentar ao máximo a “exposição” na coluna direita do *software* para o ajuste de foco. Após este ajuste, a exposição pode ser reiniciada.

A escolha da filmagem colorida pode ser feita em “Colour Space”. A *webcam* utilizada neste trabalho disponibiliza a opção “RGB24”, a qual permitirá uma filmagem colorida e “I420” que será monocromática. Se for selecionado a opção colorida e a imagem continuar preto e branco, será preciso clicar na opção “Show” em “Filter options”, selecionar a opção “configurações avançadas” e alterar a intensidade de cor.

O fps (frames por segundo) de acordo com Mendes [6], “é definido como a unidade de medida do ritmo de um dispositivo audiovisual registrar imagens, ou seja, é o número de imagens que o dispositivo registra ou exibe por unidade de tempo”. O fabricante desta *webcam* utilizada indica que a mesma opera com 30 fps, mas isso pode ser modificado no Sharpcap, caso necessário.

A “exposição” está relacionada ao fluxo de fótons que permitimos serem captados e registrados no sensor CCD [7]. A mesma está relacionada diretamente com o “ganho” logo abaixo, ou seja, para aumentar ou diminuir a exposição por exemplo, devemos alterar o ganho para que haja um equilíbrio do ruído capturado. O restante das configurações é de preferência pessoal.

Para iniciar a captura de vídeo, clicamos em “Start Capture” e determinamos a quantidade de frames desejada. Para Júpiter e Saturno, por exemplo, notamos que o valor de 1000 frames é apropriado. Após a filmagem, o Sharpcapture salva o vídeo em AVI, nomeando-o com o horário da filmagem e o salva em uma pasta criada pelo próprio *software* com a data da filmagem. Além disso, cria um documento de texto sobre as configurações utilizadas para a captura e também um histograma RGB.

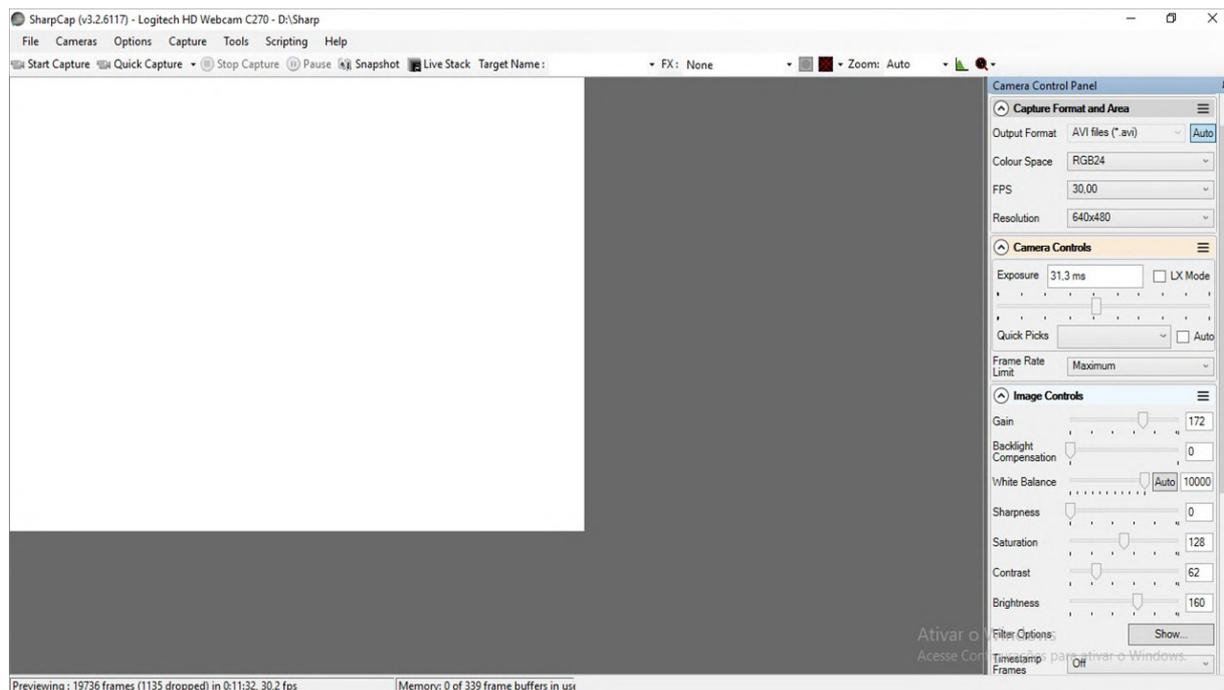


Figura 5: Interface do Sharpcap.

Com o vídeo produzido pela *webcam* ou pelo aparelho celular, podemos seguir para o próximo *software*. É importante mencionar que o formato do vídeo deve estar em “.avi” e que aparelhos celulares normalmente filmam em “.mp4”, sendo assim, é necessário fazer esta conversão para o próximo *software*.

O *software* Castrator é responsável por recortar o vídeo e centralizar o objeto observado, eliminando aqui as instabilidades do acompanhamento convencional. O desenvolvedor deste *software*, Emil Kraaikamp [8], justifica este recorte indicando que “a maior parte desse espaço não é realmente necessária porque o planeta ocupa apenas uma pequena parte da gravação e esses dados em massa também tornam o processamento desnecessariamente lento”.

Com o Castrator aberto (Figura 6), podemos clicar em “Open AVI File” e escolher a filmagem anterior. O desenvolvedor recomenda utilizar um valor de 5 para o “Planet detection threshold”, isto indicará que o vídeo, ao final do processamento, terá a centralização do globo planetário em 95% aproximadamente, porém, nada impede que sejam investigados outros valores. Além disso, é possível estabelecer uma nova dimensão para o vídeo nas opções “width” (largura) e “height” (altura), mantendo o planeta centralizado.

Ainda, é importante que, se o vídeo no Sharpcapture anteriormente gravado for colorido, a opção “RGB24” deve ser selecionada para que o vídeo siga para a próxima etapa ainda em cores. A partir disso, podemos clicar em “Process AVI” e finalizar o processo de compactação e centralização da imagem planetária realizada pelo Castrator. O novo vídeo será salvo na mesma pasta que o anterior e com o acréscimo “castr”.

Na sequência, utilizaremos o próximo *software*, o AutoStakkert. Segundo Emil Kraaikamp [8], também desenvolvedor deste *software*, o mesmo extrai os frames mais nítidos de um vídeo e os combina em uma única imagem minimizando as distorções atmosféricas. Sua praticidade o torna um dos *softwares* mais populares entre os astrônomos amadores.

Desta forma, ao abrir o AutoStakkert, podemos selecionar o vídeo anterior com o sufixo “castr” e arrastá-lo ao *software*, ou também podemos clicar em “open” e selecionar o vídeo anterior. Na tela da direita podemos ver o vídeo com o planeta ou objeto filmado centralizado e na tela da esquerda o painel onde serão ajustadas as primeiras configurações (Figura 7).

Em “Image stabilization” recomendamos utilizar a opção “planet (COG)”, a qual Lodriguss [9] indica que é referente a filmagens de planetas e para esta opção, devemos acionar a caixa “Dyna-

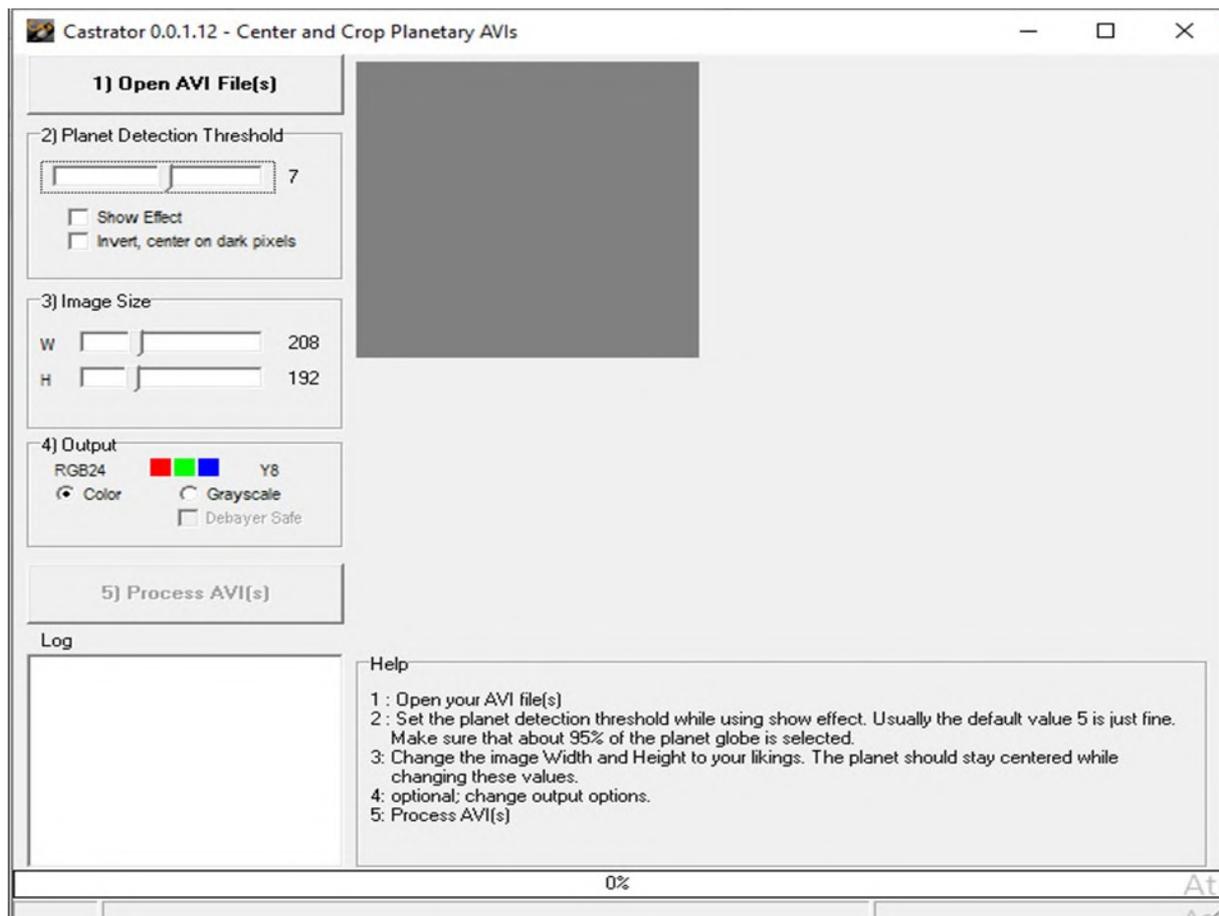


Figura 6: Interface do Castrator.

mic background” logo abaixo. Para as filmagens das crateras da Lua e também das manchas solares, o autor indica que devemos utilizar a opção “surface”.

No quadro abaixo, em “Quality Estimator” podemos selecionar a opção “Gradient” a qual é utilizada para planetas maiores como Júpiter e Saturno. A opção “Edge” deve ser selecionada quando o intuito é capturar planetas menores como Marte, Mercúrio e Vênus.

Em “Noise Robust” ajustamos a quantidade de detalhes e ruído no vídeo. Se a filmagem do planeta em questão for de boa qualidade, com pouquíssimos ruídos, percebemos que um número pequeno, como quatro, já basta para o vídeo ficar com melhor qualidade. Se houver muito ruído, é possível utilizar um número maior. Após isso, devemos selecionar a opção “Global (Frame)” uma vez que isso indicará ao Autostakkert para utilizar o mesmo subconjunto de frames para o empilhamento.

Com isso, podemos clicar em “Analyse” e o Autostakkert examinará cada frame individual do

vídeo e criará um frame de referência para que todos os pontos de alinhamento sejam alinhados com este [9].

Após a conclusão desta análise, aparecerá um gráfico de qualidade no quadro da esquerda. Neste gráfico, constarão duas funções: a função do ruído da filmagem, que será mais irregular; e a função verde, que foi construída na análise da qualidade dos frames feita pelo Autostakkert anteriormente.

Devemos agora, selecionar os frames que estarão mais próximos daquele frame de referência produzido pelo Autostakkert. Clicamos no ponto de intersecção da função verde com a função irregular, uma vez que neste ponto, os frames estão mais próximos do nosso frame de referência [9]. A partir daí, o Autostakkert gerará um valor percentual no canto superior esquerdo da janela da direita, conforme aponta a seta branca da Figura 8.

Desta forma, copiamos o valor da porcentagem na linha do frame (no nosso caso é de 49%, pois o *software* aceita apenas números inteiros) e co-



Figura 7: Interface do Autostakkert.

locamos no primeiro quadrado da opção “Frame percentage to stack” da coluna “Stack Option” da janela inicialmente a esquerda. Por fim, podemos clicar em “Stack” para o *software* realizar o empilhamento.

O último *software* de processamento utilizado neste trabalho foi o Registax 6, o qual pode ser utilizado para alinhamento, empilhamento e processamento final de imagens planetárias. Foi desenvolvido por sete equipes de países diferentes, e tem sido atualizado constantemente devido a demanda, essencialmente de astrônomos amadores nos fóruns destinados à astrofotografia [10].

Com o processo anterior concluído, podemos abrir o Registax 6 e carregar a imagem finalizada anteriormente. Feito isso, o *software* entenderá que a etapa de alinhamento e empilhamento já fora realizada e irá para a etapa de “wavelet” (Figura 9), a qual consiste na diminuição dos ruídos e aprimoramento de detalhes do planeta em questão.

Em “Wave filter” podem ser selecionadas as opções “Default” ou “gaussian”. Esta última permite um maior controle do ruído e nitidez da imagem. Conforme mostra a Figura 9, a coluna esquerda consiste nos “layers” que podem ser ajustados deslizando a barra conforme preferências.

A coluna da direita é constituída de funções que dependem muito da imagem produto para terem necessidade de serem utilizadas. Desta forma, relataremos aqui o que consideramos importante em nossa prática.

Temos a possibilidade de editar o histograma do canal RGB, o qual permite a visualização e edição das principais cores da imagem. A opção

“Gamma” permite um controle da luminosidade da imagem. Podemos editar o balanço de cores para as imagens coloridas em “RGB balance”, clicando na opção “Autobalance”. Além disso, é possível editar o ruído novamente, mas agora na opção “Denoise/Deringing”. Por último, é possível editar o contraste da imagem em relação ao seu brilho movendo as barras no canto inferior à direita.

Feito isso, podemos clicar em “Save image” e salvar a imagem nos formatos .jpeg, .bmp, .fit, .tiff ou .png.

3 Resultados e discussões

A instrumentação que utilizamos para permitir um acoplamento adequado no telescópio mostrou-se suficiente para as filmagens e fotografias que pretendíamos. Além de proporcionar a estabilidade necessária, o suporte para celular e também o cano que anexamos na *webcam* não dependem de muito investimento, sendo uma alternativa bastante viável a quem quer introduzir-se na astrofotografia.

A operação com os *softwares* utilizados neste trabalho e que encontramos sendo citados em diversos fóruns de astronomia amadora, onde destacamos a Ref. [1], é simples e não demanda muito conhecimento prévio. Em muitas situações os estudamos investigando diferentes medidas e proporções, relatando aqui o que consideramos essencial.

Apresentamos na sequência os resultados que obtivemos de Júpiter e Saturno, utilizando o apa-

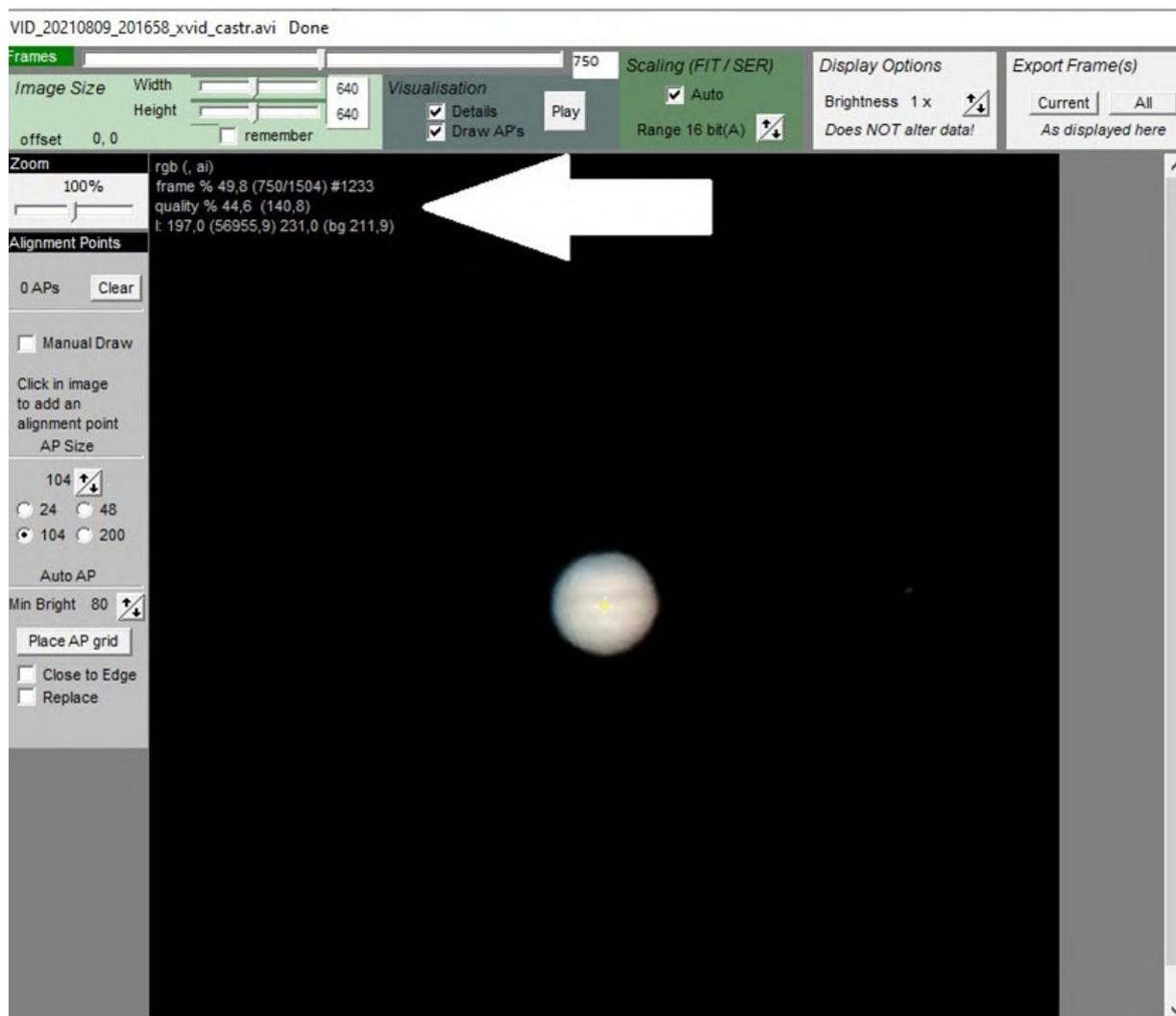


Figura 8: Valor percentual dos frames alinhados com o frame de referência.

relho celular (Figura 10 e Figura 11) e a *webcam* (Figura 12 e Figura 13). Ambas passaram pelas etapas de processamento descritas neste artigo.

Apresentamos na Tabela 1 as configurações de nosso conjunto óptico para a obtenção destas imagens.

Tabela 1: Configurações do conjunto óptico

Diâmetro do espelho	150 mm	
Distância focal do telescópio	750 mm	
Razão focal	f/5	
Distância focal das oculares	10 mm	23 mm
Ampliação	75x	32x
Astrofotografia	Saturno	Júpiter

Nas noites de observação, Júpiter e Saturno

apresentavam um diâmetro angular de aproximadamente 45" e 17" de arco, respectivamente. Sabendo que Saturno está aproximadamente 650 milhões de quilômetros de distância de Júpiter, optamos por utilizar a ocular de 10 mm para Saturno, aumentando seu diâmetro angular em 75 vezes, e a ocular de 23 mm para Júpiter, com ampliação de 32 vezes, como pode ser visto na Tabela 1.

Considerando o diâmetro de Júpiter de 139.800 km e também as imagens processadas pelo celular com dimensões de 640x640 pixels cada, podemos estimar a escala do plano focal em segundos de arco por pixel destes planetas. Obtivemos como solução aproximada 0,69"/pixel.

Segundo Staudt et al. [11], “para obter imagens de céu profundo devem-se utilizar amostragem da ordem de 1,5 a 2,5"/pixel e na obtenção de imagens de planetas (alta resolução) as



Figura 9: Registax 6 na etapa de wavelet.



Figura 10: Saturno pelo celular.



Figura 11: Júpiter pelo celular.

amostragens devem ser cerca de 0,25 a 0,5"/pixel". Desta forma, acreditamos que as imagens que conseguimos obter com esta técnica se aproximam da qualidade desejada, sendo possível observar importantes detalhes dos planetas.

Na sequência, apresentamos as imagens obtidas com a *webcam*. Como já mencionado, para a técnica focal é necessária a remoção da ocular, justificando a mesma ampliação das fotografias obtidas com a *webcam*. Ambas as imagens tiveram

uma dimensão de 368x384 pixels. Novamente calculando a escala de placa a partir das imagens obtidas, obtemos como resultado 1,68"/pixel.

Analisando estes resultados, podemos inferir que a *webcam* utilizada neste projeto pode resolver melhores detalhes em céu profundo, isto é, com a fotografia de nebulosas, aglomerados e galáxias, apesar de edições nas etapas de processamento ainda serem possíveis. Além disso, é possível experimentar técnicas de redução e aumento



Figura 12: Saturno pela *webcam*.

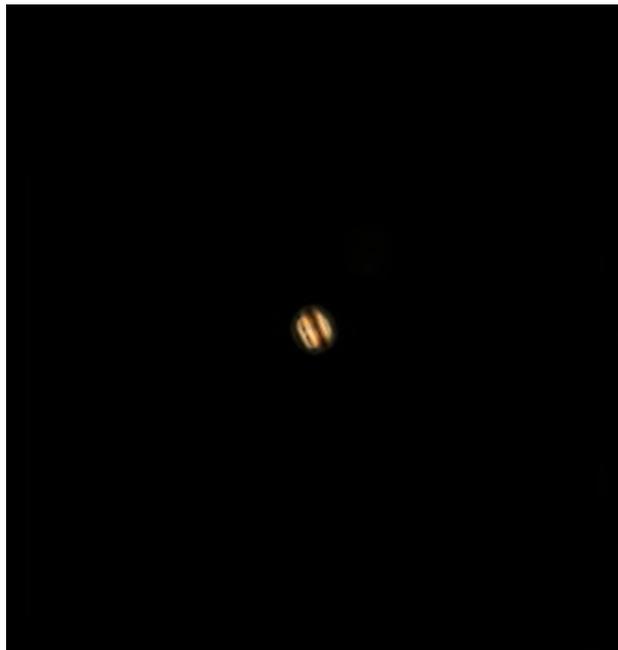


Figura 13: Júpiter pela *webcam*.

da distância focal do telescópio (através de lentes Barlow, por exemplo) para adequá-lo ao tipo de observação desejado.

Por outro lado, as fotografias com o aparelho celular demonstram ricos detalhes dos planetas, demonstrando-se como um ótimo instrumento a quem deseja iniciar-se na astrofotografia. Além de ser um aparelho presente no cotidiano da maioria das pessoas, as fotografias mostram que são possíveis registros de particularidades dos planetas, como o anel de Saturno e também as nítidas diferenças entre as faixas atmosféricas de Júpiter.

Vale ressaltar que estas fotografias foram obtidas em noites diferentes e próximas ao centro de nossa cidade. Ou seja, mesmo com poluição luminosa e trepidações causadas pela movimentação de carros nas proximidades, conseguimos registrar detalhes bastante significativos destes distantes planetas.

4 Considerações finais

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de popularizar a astronomia através da astrofotografia. Além do produto final ser a imagem processada, a técnica de filmagem para empilhamento dos frames pode ser útil para transmissões ao vivo, sejam estas em redes sociais utilizando diretamente o celular ou conectando um projetor

multimídia ao computador e realizando a projeção da tela.

Apresentamos neste trabalho as imagens de Júpiter e Saturno. Porém, podem ser capturadas imagens de: Vênus, para observar suas fases; Marte; a Lua com a observação de suas crateras e fenômenos de ocultação em geral. Ainda, são possíveis os registros de eclipse lunar, com a filmagem ou a fotografia. É possível também fazer observações do Sol com a proteção do filtro apropriado, onde podemos transmitir um eclipse solar e/ou as manchas solares. Vale ressaltar que para o Sol é recomendável verificar constantemente a temperatura da *webcam* ou do celular para evitar eventuais prejuízos.

A divulgação da astronomia através da astrofotografia pode permitir que a população compreenda um pouco mais aquelas imagens cheias de cores que vemos rotineiramente dos telescópios espaciais e que nos instigam à ciência. Esta articulação pode incentivar o pensamento crítico e impossibilitar quaisquer interpretações equivocadas a respeito do sistema solar, como o exemplo do vídeo da Lua em uma aproximação exagerada e que gerou teorias conspiratórias [12].

Além da astrofotografia ser um excelente meio para popularizar a astronomia, em ambientes formais também pensamos que isto seja possível e profícuo. Os professores que trabalham na educação básica podem desenvolver atividades que

incentivam os alunos na construção de telescópios com materiais alternativos, dos instrumentos para a astrofotografia, do processamento das imagens e das investigações do sistema solar como um todo.

Não faz muito tempo que o conhecimento sobre o sistema solar estava enclausurado em alguns livros e pertenciam a um pequeno grupo de cientistas. O desenvolvimento da tecnologia permitiu que a astronomia alcançasse um maior número de pessoas, contribuindo com a enculturação científica, tão necessária nos dias de hoje. Conhecer o sistema solar é conhecer a nossa casa, e isso jamais deveria estar afastado do cotidiano das pessoas.

Para conferir mais resultados, desenvolvemos o site <https://astroifsc.wixsite.com/astronoifsc/astrofotografia>, onde temos publicadas diversas fotografias e um vídeo utilizando a *webcam*, o aparelho celular e também uma câmera profissional registrando fotografias de céu profundo.

Sobre os autores

Leopoldo Gorges Neto (leo.gorges@hotmail.com) é mestrando em Ciências (Ensino de Astronomia) pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), com trabalhos de pesquisa sobre a educação em astronomia.

Eduardo Paganelli (eduardo.p27@aluno.ifsc.edu.br) é graduando em Física pelo Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), com interesse em trabalhos sobre educação em astronomia.

Egon Henrique Dums (egondums@hotmail.com) é licenciado em Física pelo Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), com interesse em trabalhos sobre o ensino de física.

Luiz Fernando Macedo Morescki Junior (luizm@ifsc.edu.br) é Doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Federal do Paraná (UFPR), com trabalhos de pesquisa sobre o ensino de ciências.

Referências

- [1] S. Iovene, *Astrobin: home of astrophotography*. Disponível em <https://welcome.astrobin.com>, acesso em mar. de 2021.
- [2] T. J. Jensen, *Budget Astrophotography: Imaging with Your DSLR or webcam* (Springer, Nova York, 2015).
- [3] T. Trigo, *Equipamento fotográfico: teoria e prática* (SENAC, São Paulo, 2003).
- [4] P. Ré, *Fotografar o céu* (Plátano, Lisboa, 2002).
- [5] L. P. dos Santos., *Luz, câmera e ausência de luz*, Revista Científica de Comunicação Social de Belo Horizonte **7**(1), 1 (2014).
- [6] J. M. Mendes et al., *Velocidade, taxa de captura de quadros e tipo de lente como limitantes experimentais para o uso de fotografias estroboscópicas digitais*, *Cad. Bras. Ens. Fís.* **33**(3), 1079 (2016).
- [7] T. A. A. Barreto e G. M. A. Almeida, *Astrofotografia: técnicas e aplicações*, *Sci. Ple.* **5**(11), 1 (2009). Disponível em <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/737>, acesso em jan. de 2021.
- [8] E. Kraaikamp, *Autostakkert!2 - lucky imaging stacking software*, *Astrophotograph* (2016). Disponível em <http://www.astrokraai.nl>, acesso em jun. de 2021.
- [9] E. Kraaikamp, *Autostakkert!2 - planetary imaging*, *Astrophotograph* (2012). Disponível em http://www.astrokraai.nl/software/manual/as2_planet.html, acesso em jul. de 2021.
- [10] Cor Berrevoets, *RegiStax - Free image processing software* (2009). Disponível em <https://www.astronomie.be/registax/index.html>, acesso em jul. de 2021.
- [11] I. R. Staudt et al., *Astrofotografia no IFC - Campus Camboriú*, in *Anais da VIII Feira de Iniciação Científica e Extensão*, editado por T. M. Bogoni e W. R. S. Melo (Instituto Federal Catarinense, Camboriú, 2017). Disponível

em <http://www.camboriu.ifc.edu.br/wp-content/uploads/2018/05/astro.pdf>, acesso em jan. de 2022.

- [12] R. Domingos, *É #FAKE vídeo que mostra Lua bloqueando o Sol por cinco segundos*, G1 – Fato ou Fake (2021). Disponível

em <https://g1.globo.com/fato-ou-fake/noticia/2021/05/28/e-fake-video-que-mostra-lua-bloqueando-o-sol-por-cinco-segundos.ghtml>, acesso em jul. de 2021.

Uma proposta de atividade didática sobre a medição do raio da Terra baseada no método empregado por Eratóstenes

Thiago Costa Caetano¹ e Camila Cardoso Moreira²

¹Universidade Federal de Itajubá

²Bhadram Tutoria e Consultoria Educacional

Resumo

Neste trabalho descrevemos uma das atividades da disciplina “AST929 – Conceitos de Astronomia” do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Itajubá. Essa disciplina foi criada em 2007 e integrada à matriz curricular com base nos inúmeros trabalhos que apontam as contribuições que a astronomia pode oferecer para o ensino de ciências. A atividade consiste na medida do raio da Terra com base no método que foi empregado por Eratóstenes (276 a.C. - 195 a.C.). Apresentamos em detalhes a construção do roteiro, para que o docente possa realizar a atividade sempre que desejar, aplicando as adaptações necessárias ao material. Trazemos também alguns relatos para ilustrar os procedimentos e os resultados que foram obtidos. Os valores determinados pelos estudantes apresentaram desvio inferior a 6% com relação ao valor teórico (em módulo) e a média dos valores apresentou um desvio de apenas -0,3%. A qualidade dos resultados e também o fato de que os estudantes não manifestaram dificuldades durante a realização da atividade indicam que se trata de um material didático com grande potencial pedagógico. Considerando ainda o fato de que a abordagem da disciplina AST929 é majoritariamente conceitual, por ser oferecida no primeiro ano, é razoável supor que a atividade seria adequada também para os anos finais da Educação Básica, em que os conceitos de astronomia podem ser explorados de maneira multidisciplinar.

Abstract

In this paper, we describe one of the practical activities of “AST929 - Concepts of Astronomy” of the Physics undergraduate course at the Federal University of Itajubá. The subject was created in 2007 and integrated into the curriculum taking into account several works available in the literature which indicate the vast contributions Astronomy can offer to Science teaching. The activity refers to the measurement of the Earth’s radius according to the method employed by Eratosthenes (276 b.C. - 195 b.C.) in ancient Greece. We describe how to build the script for the activity, so teachers can use it whenever wished as long as they perform the appropriate adjustments to the material. In this paper, we also bring some narratives about the activity within the context of the subject AST929 hoping that this might better illustrate the procedures and the results obtained. The values determined by the students are within less than 6% of deviation related to the theoretical value (absolute value) and the average showed only -0.3% of deviation. The quality of the results and also the fact that the students have manifested no difficulties during the activity indicate that this is material with great pedagogical potential. Also considering the fact that the approach of the AST929 course is mostly conceptual, as it is a subject from the first year, it is reasonable to assume that the activity would also be suitable for the final years of Basic Education, in which the concepts of Astronomy can be explored in a multidisciplinary way.

Palavras-chave: raio da Terra, Eratóstenes, atividades práticas

Keywords: Earth’s radius, Eratosthenes, practical activities

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.36681](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.36681)

1 Introdução

A astronomia é apontada frequentemente como a mais antiga de todas as ciências [1–4]. A necessidade de observar o céu e compreender o comportamento dos astros surge naturalmente na antiguidade como uma forma de garantir a sobre-

vivência dos povos. Ao compreenderem os fenômenos astronômicos, as civilizações antigas foram capazes de prever a época do plantio, as secas, as cheias do Nilo no Egito. Constate-se ainda que a astronomia teve um papel primordial naquilo que diz respeito à cultura dos povos nessa época, tanto no oriente quanto no ocidente, principal-

mente no que concerne à religião. Os fenômenos astronômicos e sua periodicidade constituíram a base para a marcação do tempo, para a criação dos calendários e determinação das principais festividades religiosas. Os astros receberam nomes próprios em cada cultura, não raramente associados às divindades de cada povo [5–7].

De tempos remotos à renascença, uma rica herança nos foi deixada. Ainda hoje utilizamos o sistema sexagesimal para a medida dos ângulos e para a marcação das horas – não que ambos os conceitos sejam completamente independentes. O calendário Gregoriano, o nosso calendário, é o resultado de um longo processo de observações e aferições. As principais festividades religiosas continuam a ser definidas a partir de eventos astronômicos como o equinócio de outono (no hemisfério sul, equinócio de primavera no hemisfério norte, aproximadamente em 21 de março). Na cartografia temos as linhas imaginárias, trópicos, círculos, os quais são definidos a partir do estudo do movimento do nosso planeta em sua órbita. E, na era da astronomia moderna, tem-se uma revolução: o sistema de mundo passa a ser heliocêntrico e, a partir dos esforços para compreender a mecânica dos astros, surge o cálculo diferencial e integral e as leis fundamentais da dinâmica. Para muitos, esse momento marca o nascimento da própria física [3, 4, 8, 9].

Dessa forma, ensino da astronomia pode oferecer contribuições extremamente significativas para o ensino de ciências, ao passo que possibilita aos estudantes o contato com aspectos epistemológicos da área, a familiarização com questões pertencentes ao domínio da natureza da ciência e com os seus métodos, com a sua história. O estudo da astronomia permite conhecermos e compreendermos a evolução dos conceitos em certas áreas, notavelmente na área de mecânica, em física. Todas essas contribuições e muitas outras já estão bem estabelecidas e existe um amplo referencial teórico em que esse assunto é adequadamente discutido [10–15]. De um modo particular, nos trabalhos [16–18] há uma revisão da pesquisa relativa à educação em astronomia e os trabalhos mostram que a produção na área tem crescido de forma acelerada nas últimas décadas, tendo ocorrido, inclusive, o surgimento de periódicos específicos no início do novo milênio.

Considerando a importância do tema, foi criada a disciplina “AST929 – Conceitos de Astrono-

mia” e a mesma foi integrada à matriz curricular do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Itajubá (Unifei). A disciplina foi oferecida pela primeira vez no ano de 2007 e está localizada no primeiro semestre do curso, o que significa que os estudantes apenas recentemente concluíram o Ensino Médio (via de regra). Porque esses estudantes tiveram pouco contato com as ferramentas matemáticas do ensino superior, a proposta da disciplina é que ela seja sobretudo conceitual e que abranja o máximo possível do conteúdo de diversas áreas em astronomia. A ideia é fornecer um panorama da área para os estudantes e despertar assim o seu interesse pelo tema e também pelo curso. Isso vai ao encontro de um outro objetivo da disciplina, qual seja, combater o índice de evasão durante o primeiro ano do curso. Nesse contexto, atividades didáticas focadas nos conceitos, com caráter mais prático e metodologias inovadoras são exemplos de alguns dos elementos que têm espaço privilegiado dentro da AST929.

Algumas atividades práticas são propostas durante a disciplina e nesse trabalho descrevemos uma delas, que se refere à medida do raio da Terra segundo o método que foi empregado por Eratóstenes na antiguidade. Trazemos também alguns relatos a partir da realização dessa atividade, onde é possível constatar que foram obtidos bons resultados. Além disso, descrevemos com detalhes como é feita a construção do roteiro para a atividade, para que os professores tenham autonomia e possam realizá-la sempre que desejarem, com os devidos ajustes ao material.

A estrutura do trabalho está organizada da seguinte maneira: primeiramente fazemos uma descrição da atividade em linhas gerais, trazendo alguns aspectos históricos relevantes e apresentando também os objetivos de aprendizagem. Na seção seguinte são apresentados alguns conceitos básicos de astronomia que serão empregados repetidas vezes durante a explicação sobre a construção do roteiro. Na sequência, a próxima seção descreve em detalhes a construção do roteiro e é dado um exemplo, o qual pode ser encontrado em anexo a este trabalho. Para ilustrar os procedimentos e os resultados, como uma forma de demonstrar a validade do que está sendo proposto, inserimos uma seção com alguns relatos baseados na aplicação da atividade feita durante a disciplina AST929. Finalizamos o trabalho com algu-

mas considerações finais e a discussão de algumas possibilidades.

2 A atividade em linhas gerais

A atividade consiste na determinação do raio da Terra conforme o método utilizado por Eratóstenes (276 a.C – 194 a.C.), matemático, gramático, poeta, geógrafo, bibliotecário e astrônomo da Grécia Antiga.

Enquanto ocupava o cargo de diretor da biblioteca de Alexandria, Eratóstenes teria tomado conhecimento de que durante o solstício de verão, na cidade de Siena (atual Assuão, Egito), o Sol passava muito próximo do zênite ao meio-dia, de forma que podia ser visto a partir do fundo de um poço naquela cidade. Em Alexandria, entretanto, na mesma data e hora, isso não era possível, pois o Sol não se encontrava no zênite. Refletindo acerca disso, Eratóstenes teria então percebido que se fosse possível medir essa inclinação e se a distância entre as duas cidades fosse conhecida, seria possível determinar a circunferência da Terra.

Conforme mostra a Figura 1, na ocasião do solstício de verão que acabamos de descrever, os raios solares incidem perpendicularmente na cidade de Siena. Portanto, um gnômon – uma haste vertical de tamanho conhecido, cuja sombra projetada é utilizada para indicar a passagem do tempo – nessa cidade exibiria nenhuma sombra. Já no caso da cidade de Alexandria, os raios solares incidentes e o gnômon formam um ângulo α . A seguinte relação é verdadeira:

$$\frac{S}{C} = \frac{\alpha}{2\pi} \quad (1)$$

em que α está em radianos, S é a distância entre as duas cidades, medida sobre a superfície da Terra, e C é a circunferência da Terra. A Equação 1 é equivalente à relação,

$$R_{\odot} = \frac{S}{\alpha}. \quad (2)$$

Portanto, para que seja possível elaborar o roteiro da atividade serão necessárias duas coisas: a) identificar uma cidade a partir da qual o Sol poderá ser visto no zênite na data em que a atividade deve ser realizada e b) determinar a distância entre essa cidade e a cidade onde a atividade será realizada – medida da sombra do gnômon.

Esses dados são fornecidos aos estudantes. Na data prevista para a realização da atividade, os estudantes devem construir um gnômon e realizar a medida do comprimento da sombra projetada no solo no momento exato indicado no roteiro, o qual corresponde ao instante da passagem do Sol pelo zênite – ou muito próximo a ele – na cidade que foi escolhida. Ao final da atividade é esperado que os estudantes sejam capazes de:

- construir um gnômon;
- realizar medidas simples de comprimento;
- determinar o ângulo implícito entre o gnômon e os raios solares incidentes;
- determinar o ângulo de elevação do Sol;
- descrever o método empregado por Eratóstenes para a determinação do raio da Terra;
- deduzir as equações 1 e 2;
- explicar porque a medida da sombra do gnômon não foi feita em um horário mais próximo do meio-dia;
- determinar o raio da Terra através da Equação 2.

Dependendo das circunstâncias em que a atividade é realizada, podemos ter ainda os seguintes objetivos de aprendizagem adicionais:

- buscar por localidades com a ferramenta Google Maps, seja através do nome ou das coordenadas geográficas;
- determinar a distância entre dois pontos sobre a superfície da Terra com essa ferramenta.

Um bom exemplo de um cenário em que esses últimos objetivos se tornam parte da atividade é aquele que estamos vivenciando no momento, em que as medidas restritivas de combate à pandemia inviabilizaram a prática de atividades na modalidade presencial. Por consequência desse cenário os estudantes encontram-se dispersos geograficamente, em suas residências, razão essa pela qual é necessário que cada um determine a distância do local onde se encontra até a cidade onde pode ser observada a passagem pelo zênite.

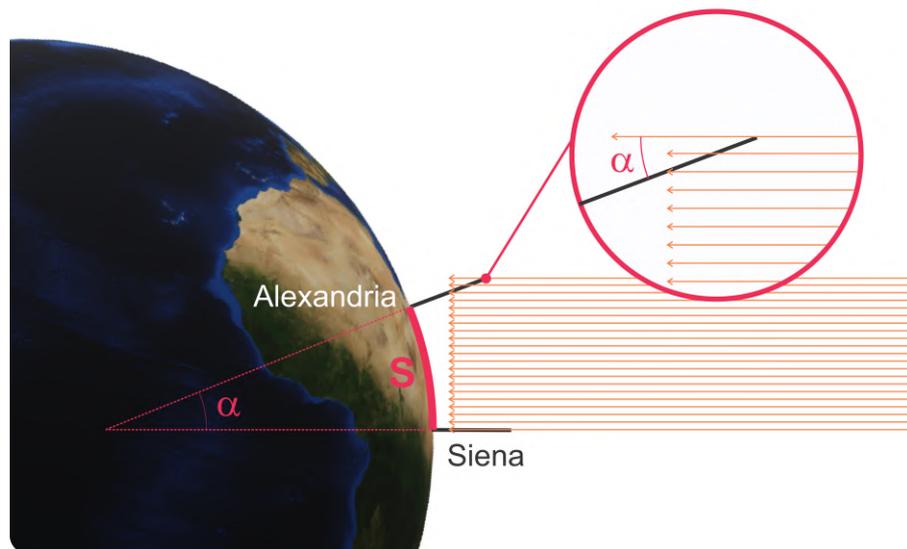


Figura 1: Representação do método utilizado por Eratóstenes. Os raios solares incidem perpendicularmente ao plano horizontal com relação a cidade de Siena, onde o gnômon é paralelo aos raios. Na cidade de Alexandria, os raios formam um ângulo α com relação ao gnômon.

3 Alguns conceitos básicos de astronomia

Apresentamos aqui alguns conceitos básicos que são úteis para compreender o significado dos termos empregados nas seções posteriores, especialmente quando descrevemos a elaboração do roteiro da atividade.

Primeiramente, vejamos como é definido o sistema local de coordenadas, ou sistema horizontal. Esse sistema consiste em duas coordenadas denominadas azimute e elevação, ou altitude. O azimute é definido como a abertura angular medida no sentido horário sobre o plano do observador, a partir do Norte – ângulo z na Figura 2b. Isto é, a origem dessa coordenada está localizada no Norte e o seu valor aumenta no sentido de norte para leste. A elevação, ou altitude, corresponde ao ângulo implícito entre o plano do observador e o segmento de reta imaginário que vai do observador até o astro – ângulo h da figura.

O zênite é o ponto mais alto da esfera celeste. Pode ser definido como a interseção da esfera com um segmento de reta perpendicular ao plano horizontal e que passa pelo observador. O meridiano local é um círculo imaginário que contém o zênite e passa pelos pontos norte e sul, conforme é mostrado na Figura 2a. Portanto, o meridiano local divide o céu em duas partes, leste e oeste. Todos os dias, o Sol, aproximadamente, nasce no leste e se põe no oeste. Em algum momento entre o nascer e o ocaso ele realiza a passagem pelo meridiano local. Nos referimos a esse momento como

passagem meridiana ou trânsito.

É importante enfatizar que a posição exata em que o Sol nasce no horizonte varia no decorrer do ano em consequência do movimento de translação da Terra e da inclinação do seu eixo de rotação. Ora ocorre um pouco mais ao sul, ora um pouco mais ao norte com relação ao leste. Esse efeito pode ser estudado com o auxílio de simuladores, como aquele que utilizamos neste trabalho. Também chamamos a atenção para o fato de que a passagem meridiana do Sol não ocorre sempre exatamente ao meio-dia. Trata-se apenas de um comportamento médio medido ao longo de um ano. Essa variação deve-se à excentricidade – pequena – da nossa órbita, que faz com que a velocidade de translação da Terra varie ao longo do ano.

4 Preparando o roteiro da atividade

O primeiro passo para a elaboração do roteiro é determinar a *elevação* do Sol ao passar pelo *meridiano local* na cidade e na data em que a atividade será realizada. Utilizamos um programa que simula um planetário, através do qual é possível obter a configuração do céu para qualquer instante, em qualquer posição que o observador estiver no globo terrestre. Existem inúmeras opções e o leitor poderá usar aquela com a qual estiver mais familiarizado. Neste trabalho utilizamos a primeira versão do programa *WinStars*.

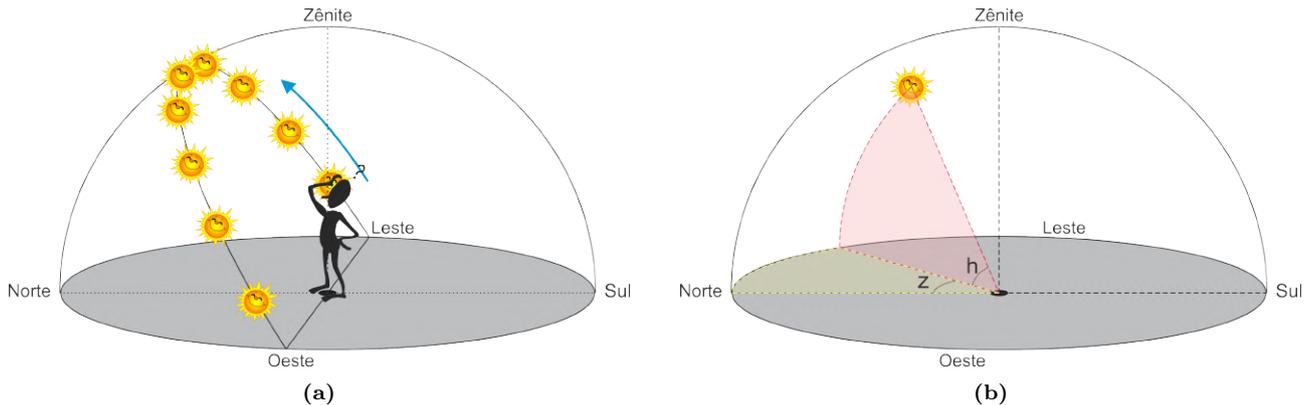


Figura 2: Representação do plano do horizonte com os principais pontos cardeais. a) Mostra o observador e a trajetória aparente do Sol na Esfera Celeste, além dos pontos cardeais norte e sul. b) Mostra como são medidos os ângulos que correspondem às coordenadas horizontais. O azimute é representado pela letra z e a altitude ou elevação do astro é representada pela letra h .

A razão pela qual optamos pela primeira versão, em particular, refere-se ao fato de que é uma versão pequena e leve, ou seja, exige poucos recursos do computador. Além disso, pode ser executada sem a necessidade de instalação e possui uma interface simples. Embora não possua todos os recursos disponíveis nas versões mais recentes, é mais que suficiente para execução da nossa proposta. Todos os recursos que serão mencionados no texto também estão disponíveis em todas as demais versões do programa e muito provavelmente em outros simuladores dessa categoria.

A interface do programa é mostrada na Figura 3. No menu lateral esquerdo encontram-se basicamente os comandos que exibem ou ocultam elementos da apresentação, como os nomes dos objetos astronômicos, as representações imaginárias e os limites das constelações, o equador celeste e a eclíptica e – o mais importante – permite que simulemos o céu desconsiderando o efeito provocado pela nossa atmosfera. Esse talvez seja um dos recursos mais interessantes deste tipo de simulador. Durante o dia não é possível observarmos as estrelas pois a luz do Sol é espalhada pela nossa atmosfera, com maior intensidade em comprimentos de ondas menores (região próxima do azul). Com o artifício de um simulador, entretanto, podemos remover a atmosfera do planeta e observar as constelações mesmo durante o dia.

O menu superior contém as funções relacionadas à localização e orientação do observador, além de algumas funções típicas de todo programa, como imprimir, copiar e colar, abrir e salvar. Utilizaremos as funções desse menu para informar a nossa posição no globo, o nosso fuso horário e a

altitude. Por último, no menu lateral direito estão as funções relacionadas à animação do céu e também algumas funções voltadas para consulta ao banco de dados do programa e para a localização de objetos.

Retomemos o nosso primeiro passo: a determinação da elevação do Sol ao passar pelo meridiano local na cidade onde será feita a medida com o gnômon. Como consequência do movimento de translação da Terra, a elevação de um astro, medida sempre em um mesmo instante do dia, varia com o passar dos dias. A sua elevação também depende da posição em que o observador se encontra na superfície do globo terrestre. Portanto, antes de qualquer outra coisa, é necessário definirmos o dia em que a atividade será realizada e o local. À título de exemplo, considere deste ponto em diante que a atividade será realizada em 18 de junho de 2022, na cidade de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

No menu superior, selecione a opção *Date and place of the observation* (botão cujo ícone é um pequeno globo terrestre). Uma nova janela irá se abrir, onde poderá informar a data, fuso horário e o local – coordenadas geográficas – em que a atividade será realizada. A cidade de Itajubá está localizada 3 horas a oeste do meridiano de Greenwich, suas coordenadas geográficas são aproximadamente $-22,4$ graus de latitude e $-45,4$ graus de longitude e está a aproximadamente 800 metros acima do nível do mar. Caso as coordenadas geográficas do local não sejam conhecidas, poderão ser obtidas na internet. O horário não precisa ser informado com exatidão, já que iremos ajustá-lo em breve. Qualquer horário próximo ao meio-

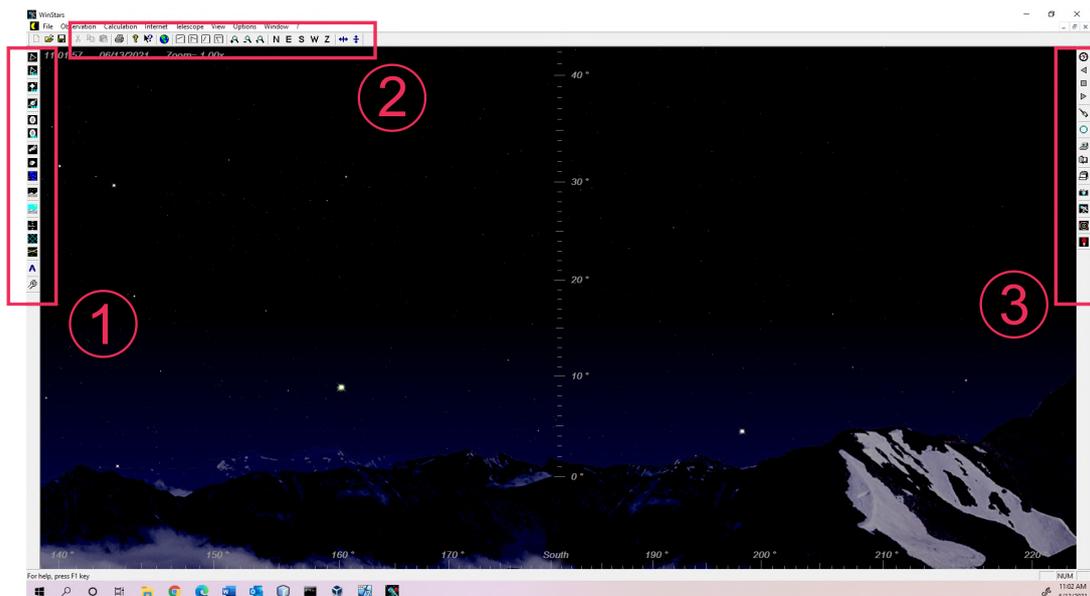


Figura 3: Interface do programa WinStars 1.0. 1 – menu lateral esquerdo; 2 – menu superior e 3 – menu lateral direito.

dia é suficiente. Feitas as devidas configurações, pressione o botão *Apply*. Agora estamos quase prontos para medir a elevação do Sol no instante da passagem meridiana. Mas em que momento exatamente isso ocorre?

Para responder a essa pergunta, precisamos antes localizar o Sol em nosso simulador. No menu lateral direito, utilize a opção *Find object* (quinta opção de baixo para cima). Na janela que irá se abrir, no grupo *Solar System*, escolha o objeto *Sun* e pressione o botão *Find*. Uma outra janela irá se abrir com informações do objeto. A passagem pelo meridiano local, ou simplesmente passagem meridiana, é também chamada de trânsito e o instante em que isso ocorre pode ser encontrado entre as informações disponíveis nessa janela. Procure pela seção sob o título *Local information* e anote a hora que é informada em *Transit*. No nosso exemplo, o valor encontrado foi 12h04.

Vamos agora ajustar as nossas configurações. Outra vez, clique na opção *Date and place of the observation* no menu superior e altere a hora local (*Local time*) para o instante da passagem meridiana. Pressione *Apply*. Sabemos que o Sol se encontra agora exatamente sobre o meridiano local. Nos resta apenas obter o valor da sua elevação. A maneira mais direta e precisa de se fazer isso é através do menu lateral direito, utilizando a opção *Find object*. Da mesma forma que antes, selecione *Sun* no grupo *Solar system* e pressione *Find*. A janela que irá se abrir contém novas in-

formações sobre o objeto. Localize o termo *Altitude*, na seção *Local information*. Esse é precisamente o valor da elevação do Sol no instante da passagem meridiana. Para a data e o local em questão, esse valor é $44^{\circ} 13' 8,3''$, ou 44,2 graus decimais, aproximadamente.

A perspectiva mostrada na Figura 4 é útil para que possamos entender melhor os passos seguintes. Na figura, a posição da Terra com relação ao Sol é aquela que corresponde ao mês de junho, inverno no hemisfério sul. No detalhe estão representados o plano do observador, o zênite e uma seta que indica a direção do Sol. O ângulo formado entre a seta e o plano do observador corresponde a elevação do astro. Todos esses elementos foram representados considerando um observador localizado no hemisfério sul, aproximadamente no local onde está situada a cidade de Itajubá.

O segundo passo na construção do roteiro consiste em encontrar alguma cidade onde o Sol passará pelo zênite na data em que desejamos que a atividade seja realizada. Para isso, imagine que o observador da Figura 4 esteja sobre uma esfera sólida e estática e que ele comece a caminhar na direção norte, tomando cuidado para manter sua longitude constante. Ele não se desloca nem para oeste, nem para o leste. Apenas na direção norte. Ele então percebe que, à medida que caminha, o ângulo de elevação do Sol vai se tornando cada vez maior. Eventualmente ele alcançará o zênite (provavelmente após anos de caminhada). Quando isso finalmente acontecer, a latitude do

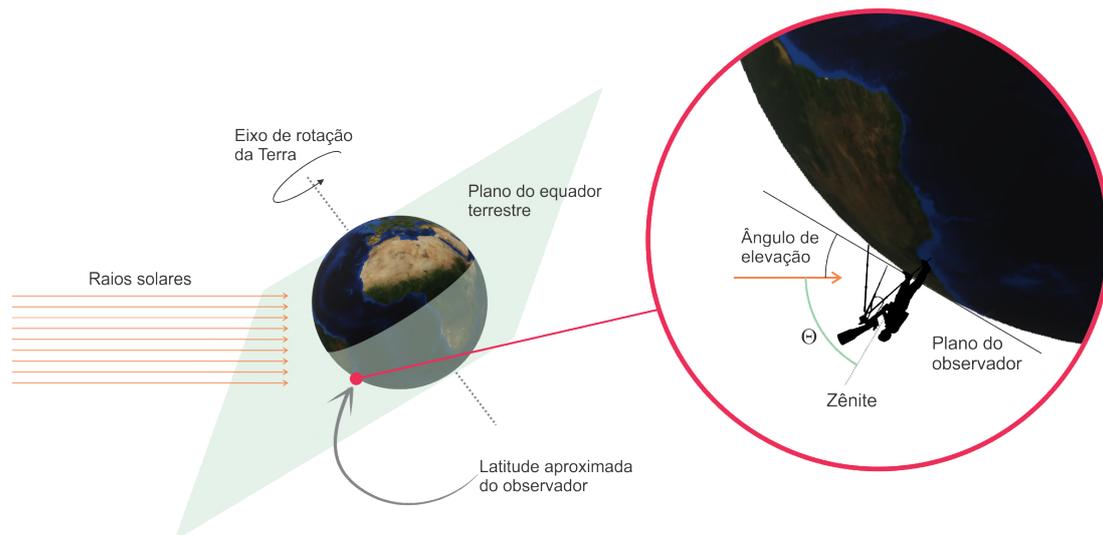


Figura 4: Representação da Terra em sua órbita durante o inverno no hemisfério sul. O observador da figura está situado aproximadamente na mesma latitude da cidade de Itajubá. À direita, o observador é mostrado em detalhes.

observador terá se alterado um ângulo equivalente ao ângulo θ , conforme é mostrado na Figura 4. Um raciocínio análogo pode ser empregado para outras localizações do observador.

No nosso exemplo, o ângulo θ equivale a 45,8 graus. Como a cidade de Itajubá está situada a $-22,4$ graus de latitude, resulta que a cidade que buscamos possui latitude igual a $+23,4$ graus, muito próxima ao Trópico de Câncer. Agora é só consultar um atlas para escolher uma cidade que satisfaça a essa condição. Há também inúmeros recursos digitais que podem ser úteis nesse sentido, como a plataforma *Map Maker*,¹ por exemplo.

A cidade de Jaumave, no México, está localizada aproximadamente a $+23,40$ graus de latitude, a $-99,38$ graus de longitude e está 6 horas a oeste do meridiano de Greenwich. São três horas a menos que a cidade de Itajubá. Significa que, no instante em que o Sol alcançar o zênite na cidade de Jaumave, estaremos três horas à frente, de acordo com o horário de Brasília (GMT-3). Recorremos ao programa *WinStars* mais uma vez para determinar esse instante. No menu superior, selecione a opção *Date and place of the observation*. Então insira as coordenadas geográficas de Jaumave, a data em que a observação deve ser realizada (18 de junho de 2022, neste caso) e o fuso horário (GMT-6). O tempo local não precisa ser exato. Qualquer horário próximo ao meio-dia é o bastante. Pressione o botão *Apply*. No menu

lateral direito, selecione a opção *Find object*. Selecione *Sun* e pressione *Find*. Na janela que irá se abrir, anote o horário da passagem meridiana, que corresponde ao instante em que o Sol estará no zênite. No exemplo que temos considerado, o horário encontrado foi 12h39 do dia 18 de junho de 2022 (horário de Jaumave, México – GMT-6).

Para sabermos o instante em que a atividade deve ser realizada na cidade de Itajubá (GMT-3), precisamos levar em consideração a diferença entre os fusos horários. Itajubá está três horas à frente da cidade de Jaumave. Significa que a atividade deve ser realizada às 15h39 do dia 18 de junho de 2022. É neste exato instante que o observador deve medir o comprimento da sombra do gnômon e determinar o ângulo α (Figura 1).

Sabemos, portanto, o instante em que a atividade deve ser realizada na cidade de Itajubá e identificamos uma cidade onde o Sol estará no zênite naquele instante. A próxima informação necessária para a construção do roteiro da atividade é a distância entre essas duas cidades. Essa informação pode ser obtida facilmente com a ferramenta Google Maps. Pesquise por uma das duas cidades, clique com o botão direito do mouse no local desejado e selecione a opção *Medir distância*. Pesquise agora pela outra cidade, clique com o botão direito do mouse no local desejado e selecione a opção *Distância até aqui*. No nosso exemplo, a distância entre Itajubá e Jaumave é de 7.743 km, aproximadamente. É importante notar que essa distância é dada sobre a superfície terrestre, como mostra a Figura 5.

¹<https://mapmaker.nationalgeographic.org>

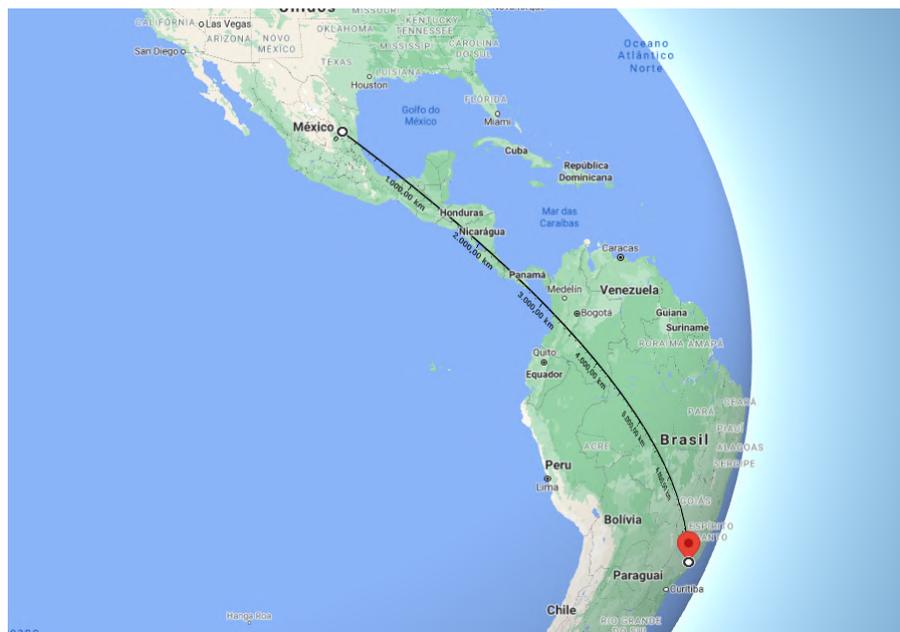


Figura 5: Distância entre Itajubá (Brasil) e Jaumave (México), medida sobre a superfície da Terra. Fonte: Google Maps[©].

Enfim, temos todas as informações necessárias para a construção do roteiro da atividade. Um exemplo está disponível no Apêndice A. Conforme os objetivos de aprendizagem, é pedido aos estudantes que descrevam o método que empregaram para a determinação do raio da Terra, apresentando e discutindo as relações matemáticas relevantes para os cálculos. Também é pedido que incluam fotografias mostrando o instante exato em que as medidas foram feitas.

5 Alguns relatos da disciplina “Conceitos de Astronomia”

A atividade tem sido realizada nos últimos anos durante a disciplina “Conceitos de Astronomia – AST929”, oferecida no primeiro semestre do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Itajubá. No ano de 2021, em particular, as medidas foram feitas no dia 6 de junho, às 14h17 (GMT-3). Neste instante, o Sol encontrava-se aproximadamente no zênite para um observador localizado na cidade de Remedios, Cuba. O roteiro da atividade foi construído segundo os procedimentos que foram apresentados anteriormente.

A Figura 6 mostra as fotografias de dois gnômons que foram construídos pelos estudantes da disciplina para a realização das medidas do comprimento da sombra projetada no solo e do ân-

gulo de elevação do Sol no instante mencionado anteriormente. De modo particular, o item 6b expressa bem a simplicidade com que esta atividade pode ser realizada. O estudante, autor da imagem, engenhosamente improvisou um gnômon com uma caneta e uma borracha para servir de base e manter o objeto na posição vertical. Os resultados do seu trabalho foram bons, apesar da precariedade do gnômon utilizado por ele. O valor determinado para o raio da Terra foi de aproximadamente 6.039 km, um desvio da ordem de -5% relativamente ao valor de referência (6.371 km).

A atividade permite que os estudantes realizem as medidas em suas próprias casas, o que é considerado um aspecto positivo. De fato, é possível perceber através da Figura 6 que os gnômons foram montados em locais variados. Isso possibilita que a atividade seja realizada mesmo durante os finais de semana e em horários extraclasses sem quaisquer dificuldades. Esse aspecto foi especialmente conveniente no ano de 2021, em que as aulas da disciplina tiveram que ser oferecidas na modalidade online em consequência das medidas restritivas de combate à pandemia. Muitos dos estudantes sequer encontravam-se na mesma cidade onde a universidade está situada. Por conta disso, além do roteiro utilizado tradicionalmente, também foi necessário fornecer aos estudantes instruções sobre como calcular a dis-

tância entre a cidade onde estavam e a cidade-alvo, ou seja, a cidade na qual um observador veria o Sol aproximadamente no zênite na data e hora indicadas no roteiro.

As instruções foram oferecidas na forma de um vídeo-tutorial e consistiram basicamente na última etapa da construção do roteiro, a qual foi apresentada anteriormente. Os estudantes utilizaram a ferramenta Google Maps para obter o valor da distância medida sobre a superfície da Terra. Felizmente, todos eles encontravam-se no mesmo fuso horário (GMT-3), do contrário também teria sido necessário realizar ajustes quanto ao instante das medições. Essa situação é improvável, todavia, considerando a localização da universidade e que a maior parte do território brasileiro se encontra no horário oficial de Brasília.

A Tabela 1 contém os resultados obtidos por 8 estudantes da disciplina, aqueles que realizaram a atividade e a entrega do relatório. O valor de referência adotado para o raio da Terra foi de 6.371 km. Sabe-se que nosso planeta não é perfeitamente esférico e que esse valor apresenta pequenas variações. Contudo, esse é um valor médio e as variações são irrelevantes para a realização da atividade proposta, tendo em consideração que: i) se trata de uma atividade didática focada muito mais no método e nos aspectos conceituais e epistemológicos do que na precisão instrumental e nos valores absolutos; ii) os erros associados aos procedimentos adotados pelos estudantes, aos instrumentos que foram utilizados e ao próprio método são consideravelmente maiores que a amplitude das variações que foram citadas.

Tabela 1: Resultados das medidas feitas por 8 estudantes da disciplina “AST929 – Conceitos de Astronomia” no dia 6 de junho de 2021.

	Raio (km)	Desvio relativo (%)
E1	6.039	-5,2
E2	6.437	1,0
E3	6.383	0,2
E4	6.354	-0,3
E5	6.255	-1,8
E6	6.413	0,7
E7	6.164	-3,2
E8	6.769	6,2

Apesar de todas as limitações, a tabela mostra que os estudantes foram capazes de obter bons resultados, com três deles (E3, E4 e E6) obtendo

valores com desvio inferior a 1%, relativamente ao valor de referência. Todavia, mais importante do que os valores obtidos é o fato de que os resultados indicam que os estudantes realizaram a coleta de dados corretamente e seguiram precisamente os passos da atividade.

6 Considerações finais

Neste trabalho buscamos apresentar os detalhes da construção do roteiro para uma atividade prática em astronomia. A abordagem utilizada é essencialmente conceitual e visa também familiarizar os estudantes com aspectos epistemológicos da astronomia antiga, em particular com o método que foi empregado por Eratóstenes de Cirene para a determinação da circunferência da Terra.

Algumas tecnologias digitais são fundamentais para a construção do roteiro, entre elas um simulador do céu e a ferramenta *Google Maps*. Embora essas ferramentas sejam normalmente empregadas exclusivamente pelo professor durante a fase de construção do roteiro, existe a possibilidade de que elas sejam utilizadas também com os estudantes dependendo das circunstâncias em que a atividade é realizada ou das escolhas feitas pelo docente. No texto foi mencionado o cenário atual, por exemplo, em que as medidas de distanciamento social tornaram inviáveis a prática de trabalhos coletivos na modalidade presencial. Nesse cenário os estudantes encontram-se dispersos geograficamente e, portanto, devem recorrer às plataformas mencionadas para o cálculo da distância entre a sua localização e a cidade onde o Sol poderá ser observado no zênite. Mas é claro que isso não precisa ser sempre determinado por fatores extrínsecos. Essa abordagem pode ser uma opção do docente, para que os estudantes desenvolvam também alguma familiaridade com esses recursos digitais. Para tanto, basta omitir a informação da distância no roteiro e deixar a cargo dos estudantes que obtenham essa informação.

A preparação do roteiro segundo os procedimentos que foram apresentados aqui é uma boa forma de introduzir o recurso do simulador do céu. Uma vez que tenha domínio dessa ferramenta, o docente poderá utilizá-la com os estudantes em outros contextos. Mesmo na atividade proposta a ferramenta pode ser empregada para estender e aprofundar as discussões em torno do



(a)



(b)

Figura 6: Dois gnômons construídos pelos estudantes para realização das medidas do comprimento da sombra projetada no solo em 6 de junho de 2021.

tema. Com respeito a esse aspecto, a proposta apresentada aqui e o roteiro dado como exemplo devem ser vistos também como um ponto de partida para a construção de atividades, sequências didáticas, abordagens mais elaboradas. À título de exemplo, depois da atividade concluída, os professores poderão trazer para sala de aula – ou para a sala virtual – os resultados obtidos por todos e checar esses valores com auxílio do simulador. Na ocasião poderão ainda demonstrar para os estudantes como observadores em diferentes locais do globo veem o Sol em um mesmo instante, de que forma a elevação do Sol se altera em função da latitude e como a longitude influencia no instante na passagem meridiana. Na verdade, existe a possibilidade de que o próprio conceito de fuso horário ganhe um novo significado para os estudantes nesse processo.

Uma possibilidade que deve ser considerada ao planejar a atividade é a de que não seja possível realizar as medidas na data desejada devido às condições meteorológicas. Apesar dessas condições serem em média bastante favoráveis durante o mês de junho na região sudeste do nosso país, com tempos secos e pouca probabilidade de chuva, ainda existe uma chance de ocorrência de

nuvens e, portanto, a sombra do gnômon pode não ser perceptível no instante em que a medida deve ser feita. Ou pode ser que ela esteja demasiadamente esmaecida, ao ponto de que o erro associado à medida se torne significativo. Por essa razão, é recomendável sempre fornecer aos estudantes uma segunda chance, pelo menos. Deve-se preparar sempre mais de um roteiro considerando datas diferentes e os prazos de entrega devem ser flexíveis.

No caso da disciplina AST929, alguns estudantes relataram que não foi possível realizar a medida no exato instante indicado no roteiro, mas que a fizeram alguns minutos depois. Isso é algo que ocorre de forma recorrente devido principalmente à passagem de nuvens e não compromete a atividade desde que o atraso não seja algo significativo, digamos, superior a 20 minutos. Quanto mais nos afastamos do horário da medição indicado pelo roteiro, seja para mais ou para menos, maior será o erro que estaremos cometendo.

Na Figura 7, a linha vermelha mostra o comportamento da elevação do Sol para o dia 18 de junho, no período próximo às 15h39. O instante previsto para a realização da atividade está indicado por uma linha tracejada vertical. A linha

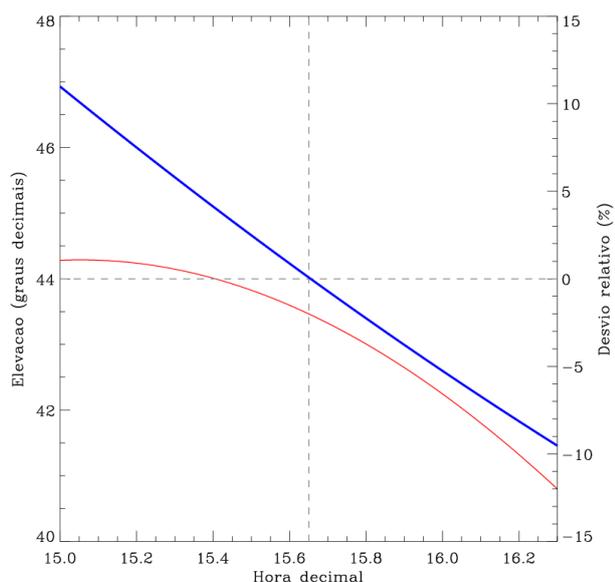


Figura 7: Elevação do Sol para o dia 18 de junho de 2022, observado a partir da cidade de Itajubá - MG, Brasil (GMT-3). A linha tracejada vertical indica o instante em que a medida da sombra do gnômon deve ser realizada, 15h39. A linha vermelha corresponde à elevação do Sol em graus decimais. A linha sólida azul representa o desvio relativo associado à medida do raio da Terra para instantes diferentes daquele recomendado pelo roteiro da atividade. A linha tracejada horizontal indica o desvio relativo igual a zero.

sólida azul indica o desvio relativo associado à medida do raio da Terra em função do horário em que é feita a medida da sombra do gnômon. O gráfico mostra que existe um desvio relativo de aproximadamente 5% se a medida for realizada 20 minutos após o instante recomendado pelo roteiro.

A melhor alternativa é que a medida seja realizada no dia seguinte, respeitando o horário indicado pelo roteiro. Na verdade, as instruções nele contidas permanecem válidas por um intervalo de cerca de duas semanas. Isso acontece porque o deslocamento aparente do Sol na esfera celeste é lento o bastante para que a configuração do céu não se altere significativamente entre dois dias consecutivos, ou mesmo durante alguns dias. Exceção se faz para objetos mais próximos como a Lua e os planetas da órbita interna. Contudo, esses objetos não têm relação com a atividade. O simulador apresentado neste trabalho pode ser utilizado para averiguar esse comportamento.

Essas questões relacionadas aos erros e sobre a validade dos procedimentos também podem constituir uma estratégia interessante de ensino. Nessa perspectiva, os professores poderiam uti-

lizar o simulador durante a atividade para explorarem a relação entre o movimento aparente do Sol e a incerteza associada à medida do raio da Terra de acordo com os procedimentos sugeridos no roteiro. São inúmeros os desdobramentos que podem ocorrer a partir da proposta que foi apresentada neste trabalho e esperamos, assim, que ela contribua como uma alternativa simples e viável aos professores que desejam explorar os conceitos e recursos relacionados, bem como sirva de estímulo para que mais conteúdos de astronomia sejam incluídos no currículo da licenciatura em física e também da educação básica.

Sobre os autores

Thiago C. Caetano (tccaetano@unifei.edu.br) possui doutorado em ciências com ênfase em astronomia pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP). Tem atuado como docente no Instituto de Física e Química da Universidade Federal de Itajubá desde 2010 e conduzido investigações nos campos da educação em ciências e do ensino de física. Possui experiência com a produção de experimentos didáticos controlados remotamente, com a metodologia *Design-Based Research*, com o desenvolvimento de sequências de ensino e aprendizagem e com atividades práticas no ensino de ciências.

Camila Cardoso (milacardoso.fisica@gmail.com) é doutora em educação para a ciência pela Universidade Estadual Paulista (Unesp). Atua como pesquisadora na área de ensino de ciências, focada principalmente em experimentação no ensino de física, educação não-formal e educação em astronomia. Tem experiência com a produção de experimentos controlados remotamente e uso de tecnologias em sala de aula.

Referências

- [1] M. C. Gutzwiller, *Moon-earth-sun: The oldest three-body problem*, *Reviews of Modern Physics* **70**(2), 589 (1998).
- [2] M. Hoskin (ed.), *The Cambridge concise history of astronomy* (Cambridge University Press, 1999).
- [3] D. Kelley, A. Aveni e E. Milone, *Exploring Ancient Skies: A Survey of Ancient and*

- Cultural Astronomy* (Springer, Nova York, 2011).
- [4] E. C. Krupp, *Echoes of the Ancient Skies: The Astronomy of Lost Civilizations*, Dover Books on Astronomy (Dover Publications, Nova York, 2012).
- [5] Bede, *The reckoning of time*, traduzido por F. Wallis (Liverpool University Press, Liverpool, 1999).
- [6] M. Yano, *Calendar, astrology, and astronomy* (Blackwell Publishing, Malden, 2003).
- [7] C. L. N. Ruggles, *Calendars and astronomy*, in *Handbook of Archaeoastronomy and Ethnoastronomy*, editado por C. L. N. Ruggles (Springer, Nova York, 2015), 15.
- [8] J. Evans e m. Evans, *The History and Practice of Ancient Astronomy* (Oxford University Press, USA, 1998).
- [9] A. McLeod, *Astronomy in the Ancient World: Early and Modern Views on Celestial Events*, Historical & Cultural Astronomy (Springer International Publishing, 2016).
- [10] J. Nussbaum, *Astronomy teaching: challenges and problems*, in *IVth International Conference on Teaching Astronomy* (Barcelona, 1990), 387–389.
- [11] H. L. Tignanelli, *Sobre o ensino da astronomia no ensino fundamental*, in *Didática das ciências naturais: contribuições e reflexões*, editado por H. Weissmann (Artmed, Porto Alegre, 1998), 57–89.
- [12] G. Townsend, *Using telescopic observations in undergraduate astronomy courses*, *The Physics Teacher* **36**(5), 304 (1998).
- [13] C. Leite e Y. Hosoume, *Os professores de ciências e suas formas de pensar a astronomia*, *Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia* (4), 47 (2007).
- [14] C. Leite, *Os professores de ciências e suas formas de pensar a astronomia*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo (2002).
- [15] R. Langhi, *Um estudo exploratório para a inserção da astronomia na formação de professores dos anos iniciais do ensino fundamental*, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP) (2004). Disponível em <http://hdl.handle.net/11449/90856>, acesso em jan. de 2022.
- [16] J. Bailey e T. Slater, *A review of astronomy education research*, *Astronomy Education Review* **2**(2), 20 (2003).
- [17] P. S. Bretones e J. M. Neto, *An analysis of papers on astronomy education in proceedings of iau meetings from 1988 to 2006.*, *Astronomy Education Review* **10**(1), 010102 (2011).
- [18] S. J. Slater et al., *iSTAR First light: Characterizing astronomy education research dissertations in the iSTAR database*, *Journal of Astronomy & Earth Sciences Education (JAESE)* **3**(2), 125 (2016).

Apêndice A: Medindo o raio da Terra

Introdução

No dia 18 de junho de 2022 (sábado) o Sol passará muito próximo do zênite para um observador na cidade de Jaumave, no México.

Dados

Coordenadas da cidade de Jaumave, México:

- Latitude: +23.40 graus
- Longitude: -99.38 graus

Distância entre a cidade de Jaumave (México) e Itajubá (Brasil), medida sobre a superfície terrestre – MG, Brasil: 7.743 km

Hora da passagem pelo zênite na cidade de Jaumave (horário de Brasília, GMT-3): 15h39

Materiais necessários

- Trena
- Gnômon

Atividade proposta

Defina um gnômon para ser utilizado. O gnômon nada mais é que uma haste vertical cuja sombra projetada no solo era utilizada para marcação das horas na antiguidade. Nessa atividade iremos utilizar a sombra projetada por esse objeto para determinar a elevação do Sol na cidade de Itajubá na data e hora que foram mencionadas.

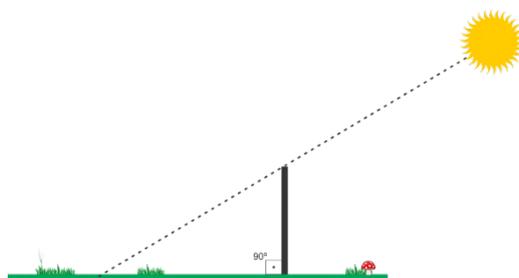


Figura 8: Representação esquemática de um gnômon e a sombra projetada sobre o solo.

Com base no método de **Eratóstenes** e nos dados fornecidos, determine o raio da Terra.

Para entregar

- Uma descrição detalhada do método utilizado, apresentando e discutindo as relações matemáticas relevantes, e os resultados que você obteve;
- O ângulo de elevação do Sol no instante da medição;
- Fotografias do gnômon, da equipe (se feito em grupo) e da sombra projetada, no momento estipulado.

Ensinar e aprender ciência: projetos interdisciplinares

Lucas Antonio Xavier^{1,2}, Chirlei de Fátima Rodrigues¹, Flávio Gimenes Alvarenga³ e Fernando José Luna de Oliveira²

¹EEEM Professora Filomena Quitiba

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

³Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Neste trabalho, nós apresentaremos o relato de uma prática desenvolvida em uma escola da rede pública estadual, a qual, posteriormente foi ampliada para um evento científico externo à escola. A prática objetivou incentivar o protagonismo dos estudantes, permitindo que os mesmos se apropriassem de assuntos relacionados à ciência. O percurso metodológico se ancora no paradigma qualitativo. Inicialmente, por meio de uma parceria com o grupo Show de Física, da Universidade Federal do Espírito Santo, foram apresentados aos estudantes trabalhos de pesquisadores em diversos campos da ciência, com a elaboração de relatórios e produção de vídeos. Participaram dessa etapa, 330 alunos do ensino médio da Escola Estadual Professora Filomena Quitiba, localizada no município de Piúma, Espírito Santo. Posteriormente, alguns dos resultados obtidos foram apresentados na IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo, onde foram exploradas temáticas como meteoros, buracos negros e ondas gravitacionais. O desenvolvimento da prática permitiu uma melhor compreensão dos temas estudados, dos métodos de pesquisa e da produção de conhecimento científico. Os estudantes se apropriaram de conhecimentos construídos historicamente, além de compreenderem a forma como estes são produzidos pelos pesquisadores e cientistas.

Abstract

In this work, we will present the report of a practice developed in a state public school, which was later expanded to a scientific event outside the school. The practice aimed to encourage student protagonism, allowing them to take ownership of subjects related to science. The methodological path is anchored in the qualitative paradigm. Initially, through a partnership with the Show de Física group, from the Federal University of Espírito Santo, the students were presented with the work of researchers in various fields of science, with the elaboration of reports and the production of videos. 330 high school students from the State School Professora Filomena Quitiba, located in the municipality of Piúma, Espírito Santo, participated in this stage. Subsequently, some of the results obtained were presented at the IV Astronomy Exhibition of Espírito Santo, where themes such as meteor, black hole and gravitational waves were explored. The development of the practice allowed a better understanding of the topics studied, the research methods and the production of scientific knowledge. The students appropriated historically constructed knowledge, in addition to understanding how it is produced by researchers and scientists.

Palavras-chave: ensino de ciências, divulgação científica, interdisciplinaridade, astronomia.

Keywords: science education, scientific divulgation, interdisciplinarity, astronomy.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37309](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37309)

1 Introdução

A Pandemia mundial da COVID-19 impôs, nos anos de 2020 e 2021, diferentes desafios pedagógicos para manter a qualidade do ensino. Conforme Araújo et al “a imersão dos alunos no ano de 2020, em meio a uma pandemia, mostrou-se desafiador para a instituição, que não apresenta uma estrutura adequada para o corpo docente e discente desenvolver atividades” [1]. Assim sendo, para mi-

nimizar tais problemáticas, desenvolvemos uma prática abordando alguns temas ligados à ciência e tecnologia para que os discentes e docentes da educação básica se tornem mais autônomos, reflexivos e críticos. Ao realizarmos diagnóstico por meio de conversas com os alunos, sobre temas científicos, percebemos que os conhecimentos prévios não contemplavam certas temáticas, como por exemplo, modelos cosmológicos, astronomia,

e gravitação, descritos em uma das competências específicas de Ciências da Natureza e suas Tecnologias no Novo Ensino Médio [2, p. 556]. Dessa forma, iniciamos este relato salientando a importância da interdisciplinaridade na prática pedagógica, sendo designada por Fourez como aquela que “se organiza em torno da noção de representação de uma situação concreta e singular com a contribuição das diferentes disciplinas” [3,4].

Nesse viés contextualizamos algumas ações realizadas a partir do ano de 2016, marco inicial da participação da escola estadual Professora Filomena Quitiba, município de Piúma, na Olimpíada Nacional de Ciências (ONC). O evento técnico-científico, é organizado pela Universidade Federal do Piauí (UFPI) e realizada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação (MCTI) e contribuições da Associação Brasileira de Química (ABQ), Departamento de História da UNICAMP, Instituto Butantã (IB), Sociedade Astronômica Brasileira (SAB), Sociedade Brasileira de Física (SBF), o que a torna um evento de grande envergadura para as escolas da Educação Básica. Foram conquistadas até o momento duas menções honrosas, em 2018 e 2020. Compreender o diálogo entre a astronomia, biologia, física e a química, na prova da ONC, representa a oportunidade complementar para os estudantes, além de atender aos pressupostos de uma prática interdisciplinar, sinalizada pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC), documento norteador da Educação Básica.

Outra ação de grande importância para nossos alunos foi a participação no Festival do Minuto em 2019,¹ juntamente com outras escolas da rede estadual. Foram organizados 36 grupos na escola Prof^a Filomena Quitiba, em Piúma.² Os grupos apresentaram trabalhos sobre: o *big bang*; deflexão da luz; GPS; curvatura do espaço-tempo; buracos negros; buracos brancos; ondas gravitacionais; lentes gravitacionais. O desempenho dos alunos foi reconhecido por meio de três bolsas de Iniciação Científica Júnior do CNPq. O Festival do Minuto constituiu parte do Projeto 100 anos da Expedição de Sobral: O Eclipse e o Teste da Relatividade Geral (Chamada CNPq/MEC/MCTIC/SEPED Nº 27/2018 - Feiras de Ciências e Mostras Científicas). A cerimônia de Premiação ocorreu no Cine Tea-

tro Metrópolis da UFES, em 6 de novembro de 2019, centenário da revelação dos resultados das medidas do desvio da luz no eclipse de Sobral e Ilha do Príncipe, que evidenciaram o triunfo da relatividade geral como a completa teoria de gravitação. Participaram alunos de cinco escolas finalistas, a saber: EEEFM Ceciliano Abel de Almeida (município de São Mateus), EEEFM Professora Filomena Quitiba (Piúma), CEEMTI Professora Maura Abaurre (Vila Velha), EEEM Leandro Escobar (Guarapari) e EEEM Professor Renato José da Costa Pacheco (Vitória). Foi uma noite importante para alunos e professores, pois a programação contou com a exposição 100 anos de Expedição de Sobral: O Eclipse e o Teste da Relatividade Geral e Sessão de Observação Astronômica. Com a apresentação da palestra *Einstein e a Divulgação Científica*, exibição de vídeos selecionados e entrega de medalhas e troféu, tal evento foi bastante influenciador no desenvolvimento do pensamento científico pelos estudantes.

A partir da experiência adquirida nos eventos acima descritos, em 2021 propomos uma prática que teve como objetivo envolver os educandos em eventos científicos, como por exemplo, na IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo, abordando temas científicos atuais. Primeiramente, optamos por uma atividade que foi realizada no início do segundo trimestre de 2021 com temas atuais de ciência, atendendo a um convite do Prof. Dr. Giuseppe Gava Camilleti, pesquisador que coordena o Show de Física da UFES. A atividade teve como viés apresentar os trabalhos em andamento nos laboratórios e centros de pesquisas da universidade, com a finalidade de ampliar a visão de mundo, como apontado pelo pensamento freiriano [5]. Em um segundo momento, outra atividade, em atendimento ao convite do Prof. Dr. Júlio César Fabris, pesquisador do Cosmo-Ufes, a escola participou da IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES 2021).

2 A metodologia

O percurso metodológico se fundamentou no paradigma qualitativo, teórico empírico, descritivo, utilizando-se de técnicas e métodos característicos da abordagem qualitativa, no caso a observação participante, onde foram valorizadas e observadas diferentes dimensões para a leitura da realidade escolar.

¹<https://www.youtube.com/watch?v=Uyr9B-wHwZ8>

²<https://www.wikifisica.com/sobral/>

1ª Aula "Temas atuais de Ciência"	Objetivo	- Ouvir o podcast e fazer um breve relatório escrito ou gravar um breve vídeo (aproximadamente 5min) com uma discussão em grupo sobre as perguntas propostas e outras que possam surgir. - Curtir os podcasts e seguir o perfil do Show de Física no Instagram @showdefisica.
	Duração	Hora/Aula: 55 minutos
	Formato	-Aula expositiva e <i>feedback</i> ao longo do trabalho.
	Descrição	-Os alunos em grupos foram organizados e orientados a produzirem vídeos com temáticas, Nanotecnologia, Buracos Negros, Grafeno e Meteoro com duração de 5 minutos. Cada grupo teve acesso ao questionário específico de cada tema.
2ª Aula "MAES2021"	Objetivo	- Orientar os alunos para a IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo - Reunir trabalhos de natureza científica com temática de Astronomia, Astrofísica, Astronáutica e Cosmologia, a serem elaborados por alunos do Ensino Médio.
	Duração	-Hora/Aula: 55 minutos
	Formato	-Aula expositiva e <i>feedback</i> ao longo do trabalho.
	Descrição	-Explicitação do Edital da IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo. Formatos dos trabalhos, procedimentos de inscrições, as fases, etapas, avaliação e premiação.

Figura 1: Organização das duas atividades interdisciplinares, (1) Temas atuais de Ciência e (2) Mostra de Astronomia do ES, desenvolvidas com os alunos do ensino médio da escola Professora Filomena Quitiba, Piúma-ES. Nela destacam-se o objetivo, tempo necessário, formato utilizado e uma breve descrição, de cada atividade.

“O estudo qualitativo [...] é o que se desenvolve numa situação natural, é rico em dados descritivos, tem um plano aberto e flexível e focaliza a realidade de forma complexa e contextualizada” [6, p. 22].

A prática, que consistiu no desenvolvimento de duas atividades intituladas “Temas atuais de Ciência” e “IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo”, conforme Figura 1, cujos participantes foram alunos do ensino médio, aconteceu na Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Professora Filomena Quitiba, localizada no município de Piúma/ES. Foram selecionadas turmas de primeira, segunda e terceiras séries do ensino médio regular.

Inicialmente foram ministradas duas aulas expositivas para 12 turmas do ensino médio participantes, onde a figura acima foi apresentada aos alunos e amplamente discutida, de modo que os alunos pudessem compreender os objetivos parciais a serem alcançados e a metodologia de trabalho abordada. Nesta figura, para facilitar a aplicação por outros professores, ou adequação das atividades propostas foram destacadas, além dos objetivos parciais pretendidos, o tempo de duração de cada atividade, a forma da abordagem com os alunos e uma breve descrição sobre a atividade. Os resultados foram socializados posteriormente em um terceiro momento.

Como instrumentos de coleta de dados foram utilizados questionários e vídeos produzidos pe-

Temáticas	Perguntas
Buracos Negros https://youtu.be/ubz81r5zk8	<ol style="list-style-type: none"> 1. O que são buracos negros? 2. E o que as ondas gravitacionais tem a ver com isso tudo? 3. Como elas podem ser medidas ou detectadas? 4. Como os cientistas descobriram que os sinais recebidos nos laboratórios Ligo e Virgo vieram da fusão de dois buracos negros? 5. Qual o futuro do estudo sobre as ondas gravitacionais? O que podemos esperar?
Nanotecnologia https://youtu.be/Of7kz3a75i8	<ol style="list-style-type: none"> 1. O que significa nanotecnologia? 2. Quais seriam as propriedades dessas nanopartículas? 3. Se não podemos ver essas partículas, como elas são produzidas? 4. Afinal, como a nanotecnologia pode então auxiliar na despoluição do meio ambiente? 5. Você poderia citar outras aplicações da nanotecnologia? 6. O Professor comenta também como se interessou por essa área de pesquisa?
Meteoro https://youtu.be/A2tMQe5rcA	<ol style="list-style-type: none"> 1. O que são os meteoros? 2. Qual a diferença entre meteoro, meteoróide, meteorito, asteroide e cometa? 3. Eles podem ser detectados antes de atingir a Terra? 4. Porque eles se concentram principalmente entre Marte e Júpiter? Isso tem a ver com instabilidade gravitacional? 5. O que podemos aprender estudando os meteoros? 6. Eles podem atingir nossa cabeça? Quais os riscos que eles podem nos trazer?
Grafeno https://youtu.be/6_5mCQre0iU	<ol style="list-style-type: none"> 1. O que é o grafeno? 2. Se o grafeno é retirado do grafite, porque eles não têm as mesmas propriedades? 3. Por que o grafeno é um material tão especial? 4. O que já é possível fazer com o grafeno? 5. Mas, podemos afinal estudar o DNA humano usando o grafeno? 6. Qual o estágio atual do aparato tecnológico para o uso dessas potencialidades no dia a dia das pessoas?

Figura 2: Lista de perguntas elaboradas pela equipe do Show da Física para as entrevistas com os pesquisadores sobre os temas buracos negros, nanotecnologia, meteoros e grafeno (Podcasts: <https://linktr.ee/showdefisica>).

los alunos. Segundo Sampieri et al. [7, p. 38], a coleta de dados visa “proporcionar um entendimento maior sobre os significados e as experiências das pessoas”.

3 Entrevistando pesquisadores com a equipe do Show de Física

Após as aulas expositivas, na etapa seguinte os alunos ouviram entrevistas, de duração de cerca de 20 a 25 minutos, realizadas pela equipe do projeto de extensão Show de Física da UFES, sobre buracos negros (com o Prof. Dr. Riccardo Sturani), nanotecnologia (com o Prof. Dr. José Rafael Cápua Proveti), meteoros (com o Prof. Dr. Sandro Ricardo de Souza) e grafeno (com o Prof. Dr. Wanderlã Luis Scopel). Esta etapa permitiu a apropriação pelos alunos de conceitos físicos relativos aos quatro temas, para que pudessem divididos em grupos escolher um deles para produção de vídeos explicativos de duração máxima de 5 minutos. A Figura 2 traz as perguntas elaboradas e realizadas pela equipe do Show da Física nas entrevistas.

Participaram desta etapa 12 turmas da Escola Estadual Professora Filomena Quitiba, num total de 330 alunos do ensino médio. Os temas com maior interesse foram: meteoros (com 17 es-

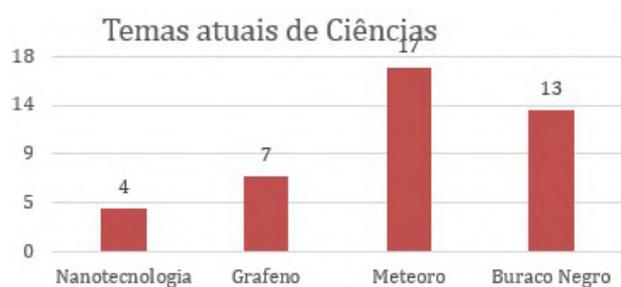


Figura 3: Relação dos grupos de alunos por tema de interesse.

colhas) e buracos negros (com 13 escolhas). Tal preferência pode estar ligada ao fato de que tais temas estão diretamente ligados à astronomia e, de modo geral, são abordados com maior frequência pelos meios de comunicação. A Figura 3 mostra um resumo da divisão de grupos de alunos por temas escolhidos: nanotecnologia (quatro grupos da segunda série); grafeno (quatro grupos da segunda série e três grupos da terceira série); meteoros (oito grupos da primeira série, quatro grupos da segunda série e cinco grupos da terceira série); buracos negros (quatro grupos da primeira série, quatro grupos da segunda série e três grupos da terceira série). Durante a avaliação, os professores perceberam que os temas de maior interesse foram, meteoros e buracos negros, sendo essa preferência atribuída ao fato, que, os dois temas são tratados de forma mais corriqueira na mídia.

Nanotecnologia e grafeno, ainda são temas mais restritos aos pesquisadores em seus laboratórios, e ainda que a sociedade já seja beneficiada pelas suas contribuições tecnológicas, despertaram um menor interesse nos alunos. Isso sinaliza a necessidade de uma maior divulgação desses assuntos, pois, um dos papéis da escola é possibilitar o letramento científico de seus discentes. Sobre o letramento científico, a BNCC nos mostra que “envolve a capacidade de compreender e interpretar o mundo (natural, social e tecnológico), mas também de transformá-lo com base nos aportes teóricos e processuais das ciências”.

Os vídeos produzidos, como resultado desta etapa, foram avaliados pela área de Ciências da Natureza da escola. Como forma de incentivo, os melhores vídeos foram premiados com brindes, certificados e disponibilizados na nuvem.³

Esta atividade ampliou o conhecimento dos estudantes acerca dos temas escolhidos e mostrou

Buraco Negro	Meteoro
- sim, porque achamos interessantes estudar isto.	- Sim é muito mais fácil
- Sim, porém o professor falava muito embolado e isso fez a gente não entender muita coisa.	- não
- Gostei sim, foi a primeira vez que tive contato com esse tipo de estudo.	- Não muito prefiro na sala de aula.
- NÃO, achei super difícil entender o que o *** dizia.	- Na verdade foi a primeira vez que participei de um trabalho assim, pra mim foi tudo nova, mas adorei participar.
- Sim, Muito bom!	- Sim muito legal poderia ter mais vezes
- Sim, achei o conteúdo muito bem distribuído e claro para o meu entendimento.	- Não, prefiro com vídeos aulas normais.
- Sim, gostamos demais!	- Sim, pois é muito mais fácil de aprender
- sim gostamos, só gostaria de sugerir vídeos com nosso idioma	- Prefiro estudar com podcast sim, é muito melhor.
- sim, acho muito interessante e tem vasto material para estudo e a cada dia surgem mais novidades em torno desse assunto.	- sim pois é uma forma interessante e diferente de adquirir conhecimento e estudar, escutar um profissional falando sobre o assunto nos passa mais interesse
- Sim, mas sugerimos que disponibilizem esse tipo de conteúdo em português.	- Sim, muito interessante estudar com esse formato

Figura 4: “Respostas dadas pelos alunos entrevistados a pergunta “Vocês gostaram desse tipo de atividade com podcasts?” cujos temas abordados foram buracos negros e meteoros.

a aplicação destes no cotidiano. Além disso, permitiu que os envolvidos na construção dos vídeos pudessem experimentar a aplicação do método científico, o que lhes dá uma noção da forma como os cientistas trabalham e a forma como o conhecimento científico é produzido.

Visualizando a participação na MAES 2021, finalizamos esta atividade coletando o depoimento dos alunos de quatro turmas do primeiro ano do ensino médio, onde eles responderam. A figura 4 mostra uma síntese desses dados. A qual traz as respostas dos entrevistados sobre a satisfação deles com a atividade, usando *podcasts* para abordar temas de astronomia (em particular, buracos negros e meteoros), respondendo a seguinte questão: “Vocês gostaram desse tipo de atividade com *podcasts*?”

As respostas dos alunos contribuíram para o aperfeiçoamento da atividade durante seu percurso. Houve trocas de ideias e compartilhamento de opiniões, que evidenciaram que, 90% dos grupos que optaram pelo tema buracos negros gostaram da atividade, enquanto que, 70% dos grupos que escolheram o tema meteoros afirmaram terem gostado da proposta de trabalho. Embora os estudantes não estejam, ainda, acostumados ao trabalho de forma interdisciplinar, a prática, por área de conhecimento, foi muito bem aceita, convergindo com a perspectiva da BNCC. O percentual de alunos que apresentaram resistência à atividade é decorrente, segundo seus relatos, pela preferência por uma atividade mais tradicional ou

³https://padlet.com/lucas_perobas/hua46weqpg6453gg

pela dificuldade de compreender o que foi apresentado pelo pesquisador convidado.

4 Participação na Mostra de Astronomia do Espírito Santo

A MAES 2021, reuniu trabalhos com temas de astronomia, astrofísica, astronáutica e cosmologia. O evento possuiu três fases, entre fevereiro e dezembro de 2021, e contemplou a diversidade de gênero nos grupos formados, sob a orientação de um professor-tutor. Participando pela segunda vez do evento, a escola foi representada por quatro grupos, formado por alunos da primeira série do ensino médio, e contou com a orientação dos professores da área de Ciências da Natureza. As reuniões com os grupos foi realizada através da sala de aula virtual, aplicativos de reuniões e mensagens, devido às restrições impostas pelas agências responsáveis, para minimizar a propagação do vírus da COVID-19. A primeira fase contou com a submissão de resumo e de um vídeo explicativo. A avaliação dessa fase ocorreu no formato remoto, com pesquisadores do Cosmo-ufes, na UFES, Campus Goiabeiras, Vitória/ES, que entrevistaram os grupos de alunos e fizeram a seleção dos melhores trabalhos para a segunda fase.

Dos quatro grupos da escola, três estavam em consonância com a temática da MAES 2021, (1) buracos negros; (2) buracos negros e ondas gravitacionais e (3) meteoros, meteoroides, meteoritos, asteroides e cometas. Somente um grupo optou por trazer para o evento a explicação de proposta fora do espectro da astronomia, fato ocorrido por problemas de comunicação, portanto, os integrantes deste grupo tiveram dificuldade para responder às perguntas quando questionados pela banca. Na apresentação do trabalho sobre buracos negros, os alunos tiveram dificuldades na segunda fase onde apresentaram 18 slides (com excelentes dados) em 8 minutos e tinham entre 15 a 20 minutos para explicitar para a banca e público presente. A intenção foi boa, porém, a cultura de decorar e consultar o celular quando dava um “branco”, demonstrou pouco domínio do assunto, entretanto, todas as condições para que o grupo adquirisse o melhor desempenho e classificação foi dada pelo professor-tutor, e, o tempo foi suficiente para a preparação. A banca sugeriu, caso o grupo fosse para a fase seguinte, a “Experi-

ência do Lençol”, para simular um buraco negro. Outro grupo com a temática parecida “buracos negros e ondas gravitacionais”, apresentou dificuldades, pois houve também problemas de comunicação que afetaram a avaliação do grupo. O grupo que apresentou o tema de meteoros, seguiu as orientações do professor-tutor durante a preparação do trabalho, respondeu todas as questões levantadas pela banca avaliadora e foi aprovado para a última etapa da MAES 2021, o que destaca a qualidade do trabalho preparado pelos alunos.

Já na segunda fase da MAES 2021, um grupo da escola estava realizando a explicação do trabalho, no meio da apresentação citou colisões de buracos negros. Ao final da apresentação foi feita arguição ao grupo, mas em um dado momento houve discussão entre dois doutorandos do Cosmo-ufes a respeito do grupo ter citado o termo colisões de buracos negros. Um dos doutorandos que acabara de ministrar palestra para o público presente, argumentou que não há colisões, e foi rebatido pelo seu colega, de que há colisões, mostrando a importância do letramento científico, em particular acerca dos jargões utilizados dentro de cada área do conhecimento. O termo “colisões de buracos negros”, aqui em questão, não pode ser interpretado no sentido literal, como uma “colisão entre duas bolas de bilhar.” Uma interpretação mais acessível seria uma fusão entre os buracos negros.

Uma alternativa para atingir os objetivos estabelecidos pela nova BNCC, em particular sobre o letramento científico, mas também para cumprir a amplitude do currículo, seria utilizar além do livro didático, metodologias alternativas de ensino, como por exemplo, oficinas, palestras, pesquisas, participação em feiras e mostras, dentre outras.

Com relação aos conteúdos de astronomia, no Novo Ensino Médio, é possível, a partir de melhorias na relação ensino-aprendizagem, melhorar a formação do egresso institucional, no tocante às habilidades e competências previstas pela BNCC. Como é o caso da habilidade EM13CNT204 – cujo significado é: EM13 (Ensino Médio da primeira a terceira série) e CNT204 (Ciências da Natureza e suas Tecnologias, habilidade 204). Esta habilidade deve possibilitar aos discentes elaborarem explicações, previsões e cálculos a respeito dos movimentos de objetos na Terra, no sistema solar e no universo com base na análise das interações gravitacionais, com ou sem o uso de dispositivos e

aplicativos digitais (como softwares, de simulação e de realidade virtual, entre outros) [2, p. 557].

No ano de 2022, terá início, na rede de ensino do Espírito Santo, o Novo Ensino Médio, norteado pela BNCC. Tópicos a serem trabalhados na escola, por exemplo, astronomia do dia a dia, sistema solar, estrelas, galáxias, cosmologia, astrobiologia e astrofísica, enriquecerão e potencializarão conhecimentos de astronomia, que irão impactar, daqui para frente, a vida dos alunos e a prática pedagógica docente. Uma forma de ampliar as metodologias e métodos seria fazer uso de espaços não formais de ensino. Neste sentido, a chegada do planetário no Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Piúma, poderá auxiliar na melhoria da relação ensino-aprendizagem, permitindo que os alunos tenham acesso a uma experiência mais visual daquilo que se vê nos livros didáticos.

5 Considerações finais

A prática relatada, com a participação dos estudantes em projetos interdisciplinares, evidenciou uma forma de potencializar as aprendizagens. A participação em olimpíadas como a ONC, com questões de astronomia, física, química e biologia permitiu uma reorientação para a área de Ciências da Natureza da Escola Estadual Professora Filomena Quitiba. Esse fato fomentou a participação em outros projetos inovadores de outras instituições de ensino e pesquisa, por exemplo, o Festival do Minuto na UFES, em 2019. Na maioria das vezes os conteúdos curriculares e programáticos não permitem o acesso a outros conteúdos, como por exemplo, o de astronomia, o que foi possível com as ações desenvolvidas.

O engajamento no Projeto Show de Física da UFES, que teve como atividade ouvir os *podcasts* com as questões feitas aos pesquisadores, onde os alunos buscaram transcrever e se apropriar dos assuntos para a produção de seus vídeos, foi inovador, possibilitando acesso ao conhecimento científico de temas como nanotecnologia, grafeno, meteoros e buracos negros. O entendimento introdutório destas temáticas possibilitou a participação dos alunos das primeiras séries na IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo, onde se aprofundaram em dois temas específicos: meteoros e buracos negros. Ao participar da mostra, os quatro grupos ainda adquiriam experiência e

conhecimentos à respeito da dinâmica de um projeto, uma vez que foi necessário respeitar o edital.

Concluimos, portanto, que os resultados adquiridos durante as atividades interdisciplinares com os alunos do ensino médio foram satisfatórios e que, o percurso metodológico permitiu o alcance do objetivo que foi envolver os educandos em eventos científicos.

Por outro lado, são necessárias outras ações a fim de inserir conteúdos de astronomia na Educação Básica. Devemos refletir sobre o papel do professor, será que os docentes da Educação Básica estão preparados para lecionar temáticas de astronomia? Slovinski et al. [8], em um estudo realizado nos mostra “que apenas um em cada quatro professores de física formados no Brasil em 2019 teve acesso a disciplina de astronomia na modalidade obrigatória durante sua formação”. Nesse sentido ressaltamos a importância da formação continuada em astronomia para os professores, como ainda salienta Slovinski et al. [8], “fomentar a formação de professores e melhor prepará-los para enfrentar os desafios da sala de aula”. A astronomia está se consolidando ainda mais com seus conteúdos no ciclo da Educação Básica e, segundo Fourez [3, p. 23], “divulgar conhecimentos suficientes para a população, de maneira que as decisões dos técnicos possam ser suficientemente compreendidas e também controladas democraticamente”. A ampliação desse processo de formação dos professores abrirá perspectiva para que os mesmos deem conta dos aspectos, das interfaces e de proporcionar a excelência de conhecimento e aprendizagem em astronomia e no ensino de Ciências em geral.

Finalmente, a prática relatada neste trabalho, baseada em um conjunto de atividades e participação em um evento como a MAES, que incentiva a metodologia investigativa e que cria um ambiente de troca de conhecimento entre alunos e professores de ensino médio com pesquisadores, na percepção dos autores favoreceu o processo de ensino-aprendizagem de temas de física que embora previstos na BNCC ainda carecem de materiais didáticos e metodologias que os contemplem.

Agradecimentos

Os autores agradecem à comissão organizadora da MAES 2021 e a todos os pesquisadores envolvidos no processo e, em especial, a Júlio Cé-

sar Fabris (Cosmo-ufes), Adriano Mesquita Oliveira (IFES-Guarapari), ao CNPq, a Secretaria de Estado da Educação – SEDU, devido ao Pró-Docência Stricto sensu (CEFOPE), aos alunos da escola Professora Filomena Quitiba que se empenharam nas atividades interdisciplinares, e ao parceirista pelas sugestões que muito contribuíram para a versão final deste artigo.

Sobre os autores

P. Lucas Antonio Xavier (lucas.perobas@gmail.com) é professor de física na Escola Estadual Professora Filomena Quitiba (Secretaria de Educação do Estado do Espírito Santo) em Piúma, ES e doutorando em Ciências Naturais na Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Campos-RJ, onde desenvolve pesquisas em Ensino de Ciências.

Chirlei de Fátima Rodrigues (chirleifrodri-gues@gmail.com) tem Mestrado em Educação em ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências e Matemática (Educimat) do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) – Vitória-ES, é professora de química na Escola Estadual Professora Filomena Quitiba (Secretaria de Educação do Estado do Espírito Santo) em Piúma, ES.

Karoline Vitória Silva da Costa (karolinevitoriasilvadacosta@gmail.com) é aluna da segunda série do ensino médio, na Escola Estadual Professora Filomena Quitiba (Secretaria de Educação do Estado do Espírito Santo) em Piúma, ES. Foi contemplada com uma bolsa de Iniciação Científica júnior na IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo, na categoria ensino médio.

Flávio Gimenes Alvarenga (flavio.alvarenga@ufes.br) é professor da Universidade Federal do Espírito Santo. Desenvolve pesquisa na área de cosmologia, atuando principalmente no tema cosmologia quântica, e na área de ensino de física com trabalhos de inserção da física contemporânea no Ensino Médio. Membro permanente do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física (PPGEnFis) - UFES / Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física - Polo 12.

Fernando José Luna de Oliveira (fernando@uenf.br), trabalha como professor da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), em Campos dos

Goytacazes-RJ. Conduz pesquisas no Laboratório de Ciências Químicas da UENF e orienta alunos de mestrado e doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Naturais, em projetos com ênfase em história das ciências e ensino de ciências, atuando principalmente nos seguintes temas: história da química no Brasil e aplicação da história como ferramenta para o ensino de ciências.

Referências

- [1] M. M. de Araújo et al., *Feira de Ciências no Padlet: Usos Tecnológicos aliado a Práticas Pedagógicas Transgressoras*, Revista Tecnologias Educacionais Em Rede (ReTER) **2**(1), e10/01 (2021). Disponível em <https://periodicos.ufsm.br/reter/article/view/65287>, acesso em jan. de 2022.
- [2] Brasil, *Base nacional comum curricular* (2018). Disponível em <http://basenacionalcomum.mec.gov.br>, acesso em jan. de 2022.
- [3] G. Fourez, *Alfabetización científica y tecnológica: acerca de las finalidades de la enseñanza de las ciencias* (Ediciones Colihue, Buenos Aires, 1997).
- [4] G. Fourez, *A construção das ciências: introdução à filosofia e à ética das ciências* (Editora da Unesp, São Paulo, 1995).
- [5] P. Freire, *Pedagogia do Oprimido* (Editora Paz e Terra, São Paulo, 2014).
- [6] M. Ludke e M. E. D. A. André, *Pesquisa em educação: abordagens qualitativas* (E.P.U., São Paulo, 1986).
- [7] R. H. Sampieri, C. F. Collado e P. B. Lucio, *Metodologia de Pesquisa* (Penso, 2017), 5^a edição ed.
- [8] L. Slovinski, A. Alves-Brito e N. T. Massoni, *A astronomia em currículos da formação inicial de professores de física: uma análise diagnóstica*, *Rev. Bras. de Ens. de Física* **43**, e20210173 (2021).

IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo

MAES 2021

Em 2021, o Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação (PPG-Cosmo), em parceria com o Núcleo Cosmo-ufes e o Observatório Astronômico do IFES Guarapari (OAIG), organizou a IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES 2021). Esta edição da MAES foi financiada pelo CNPq, recebendo também apoio da UFES e do IFES. Além disso, foi a primeira na qual estudantes matriculados em quaisquer das séries do ensino fundamental puderam submeter vídeos ligados à temática do evento. Foram 4 (quatro) trabalhos inscritos nesta nova modalidade.

Em linhas gerais, a MAES é uma competição entre trabalhos científicos cujos protagonistas são alunos do ensino básico. Desse modo, a participação no evento incentiva o uso de metodologia por investigação, aplicada ao ensino de astronomia, podendo assim auxiliar na melhoria da relação ensino-aprendizagem, na popularização da prática científica no meio estudantil e na formação de jovens pesquisadores no estado do Espírito Santo. Além disso, a MAES proporciona um ambiente de debate entre todos os participantes do evento e aproxima a comunidade em geral, particularmente aqueles que submetem trabalhos, do meio acadêmico e de pesquisadores da área de astronomia e física que, por sua vez, atuam como avaliadores dos trabalhos inscritos, ministram seminários e mini-cursos destinados tanto aos participantes quanto à comunidade em geral.

Em números gerais, a MAES 2021 teve 58 (cinquenta e oito) trabalhos inscritos, envolveu um total de 168 (cento e sessenta e oito) alunos e 20 (vinte) professores, de todas as redes e de todas as séries do ensino básico, com destacada participação da rede pública, como mostra a Figura 1. Mais de 90% dos trabalhos submetidos são da rede pública de ensino, o que se alinha com o objetivo de ajudar a melhorar a qualidade do ensino de ciências da rede pública do estado do Espírito Santo. Por outro lado, apenas 15,5% dos trabalhos inscritos foram do ensino fundamental, apresentados na etapa norte e sul; não tivemos trabalhos desta categoria na Grande Vitória.

Fazendo um comparativo da quantidade de trabalhos submetidos nos anos anteriores do evento (veja a Figura 2) pode-se observar que, com relação à edição anterior, teve-se um aumento significativo no número total de trabalhos submetidos, superior a 50%, assim como na participação das instituições federais, que teve um aumento superior a 80%, o que parece estar diretamente ligado com a flexibilização das restrições, de isolamento social e o retorno, mesmo que parcial, das aulas presenciais. Observa-se também um aumento da participação das redes estadual e municipal, que foram superiores a 30% e a 65%, respectivamente. A única queda de participação foi da rede privada, com cerca de 33% de redução. Porém, em geral, os números ainda estão abaixo das primeiras edições.

A MAES 2021 foi dividida em três fases. Na primeira fase os alunos apresentaram remota-

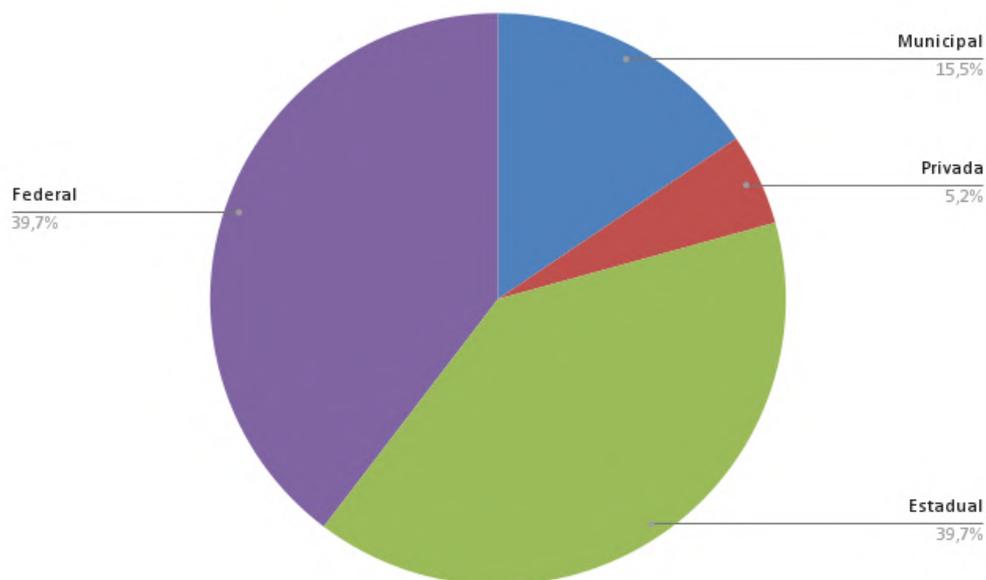


Figura 1: Divisão da quantidade de trabalhos inscritos por rede de ensino. A cor azul mostra que 15,5%, dos trabalhos inscritos, foram de alunos do ensino fundamental. A cor vermelha mostra que 5,2% dos trabalhos foram da rede privada (alunos do ensino médio). A cor verde e roxa correspondem a 39,7% dos trabalhos submetidos, foram de trabalhos da rede estadual e federal, respectivamente.

mente a ideia inicial do projeto, um pré-projeto, e participaram de um bate-papo com professores e/ou pesquisadores (incluindo mestrandos, doutorandos ou pós-doutorandos) que estudam temas ligados à astronomia. Na segunda fase, que ocorreu em três municípios – a saber: Muniz Freire (Etapa Sul), São Mateus (Etapa Norte) e Vitória (Etapa Grande Vitória) –, o progresso do trabalho, bem como os resultados parciais, foram apresentados a uma banca avaliadora, no município escolhido pelo grupo. Vale destacar que, nesta edição da MAES, assim como na de 2020, tivemos trabalhos inscritos para todas os três regiões, o que não aconteceu nas edições de 2018 e 2019.

Desta fase, foram selecionados 18 trabalhos para participar da terceira fase, que aconteceu em Guarapari. Nesta última, os projetos, em sua versão final, foram apresentados a uma nova banca avaliadora, formada por pesquisadores convidados. Esta banca, por sua vez, selecionou os melhores trabalhos desta edição do evento, que destacamos abaixo, em ordem de classificação por categoria.

Ensino fundamental

- Plutão e as descobertas da sonda New Horizons

Professor Orientador: Roger da Trindade Gomes

Alunos: Julia Oliveira de Souza, Kéwysen Bruno Marculino Feu, Thaís Santos Dias e Ágata Mayra de Souza Batista

Escola: EMEF Prefeito Roberto Calmon

- Buracos Negros: A fundo no desconhecido (Reenquadrado pela Banca Final).

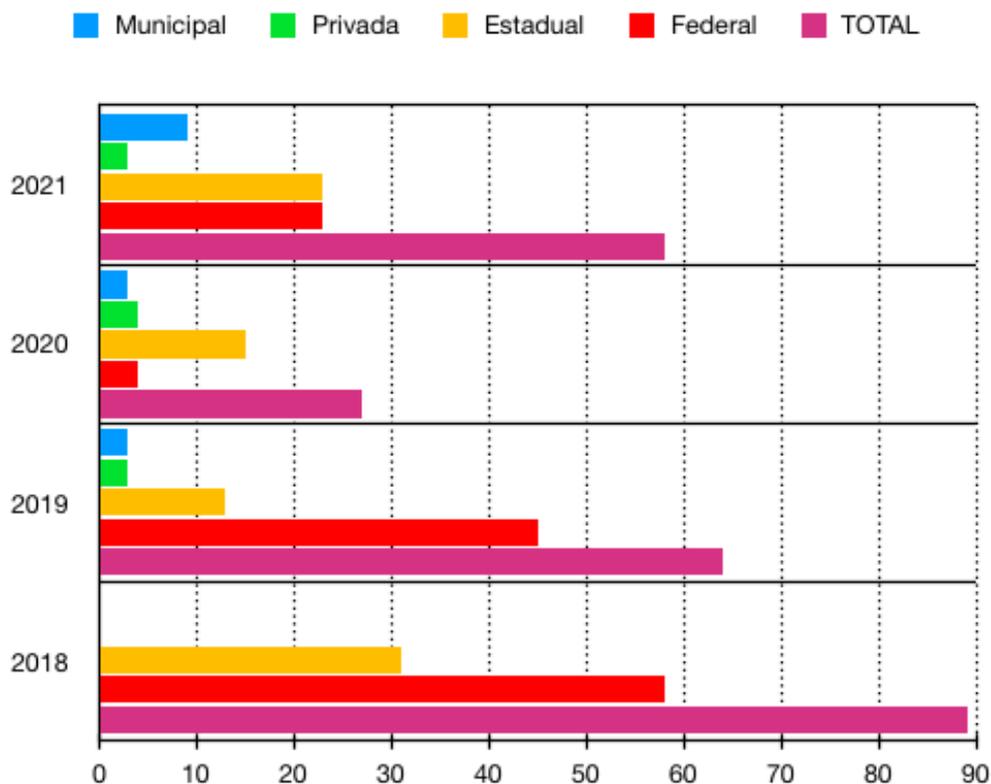


Figura 2: Comparativo do número de trabalhos inscritos em todos os anos do evento. Em azul está destacado o número de trabalhos inscritos da rede municipal. Note-se que no ano de 2018 não tivemos participação de alunos do ensino fundamental. Em verde, está destacado o número de trabalhos inscritos da rede privada que também não teve participação no ano de 2018. Em amarelo e vermelho estão os números de trabalhos submetidos pelas escolas estaduais e federais, respectivamente. Em roxo está representado o número total de trabalhos submetidos.

Professor Orientador: Tailor Raniere Waiandt.

Alunos: Julio Andreatta, Flaviano Jastrow, Gustavo Lemke, Maiza Anholz e Raquel Lemke.

Escola: Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Fazenda Emílio Schroeder

- As estações do ano e o uso do gnômon.

Professor Orientador: Cibele Kemeicik da Silva Machado.

Aluno: Estevão Neves de Almeida.

Escola: EMEIEF-Élson Garcia.

Ensino médio

- A utilização de atividades interativas na divulgação da astronomia em todos os níveis da educação básica – (**Melhor trabalho**).

Professor Orientador: Adriano Mesquita Oliveira.

Aluna: Letícia de Sá.

Escola: IFES-Guarapari.

- Trajetória das mulheres na astronomia: da fogueira ao telescópio.

Professor Orientador: Jacqueliney Souza Reis

Aluna: Andiará Soprani Alves

Escola: CEEFMTI Bartouvino Costa.

- Espectroscopia Solar com a utilização de um instrumento óptico de baixo custo.

Professor Orientador: Adriano Mesquita Oliveira

Alunos: Guilherme Lorete Schmidt e Thalita Sartori Benincá.

Escola: IFES-Guarapari.

Para obter maiores informações sobre a MAES 2021 basta acessar o site www.cosmo-ufes.org/maes2021.

Esta edição da revista Cadernos de Astronomia traz o seguinte texto construído por alunos do ensino fundamental em colaboração com seus respectivos professores-tutores:

- *Plutão e as descobertas da sonda New Horizons*

Resumo: Neste trabalho, as características da missão da sonda New Horizons a Plutão e ao Cinturão de Kuiper são descritas, assim como os principais resultados científicos obtidos.

Desse modo, a revista Cadernos de Astronomia procura incentivar a pesquisa e a difusão do conhecimento entre os estudantes de todos os níveis.

Comitê Organizador da MAES 2021

Plutão e as descobertas da sonda New Horizons

Ágata Mayra de Souza Batista, Julia Oliveira de Souza, Kéwysen Bruno Marculino Feu, Thaís Santos Dias e Roger da Trindade Gomes.

EMEF “Prefeito Roberto Calmon”, Linhares-ES

Resumo

Com o objetivo de avançar nos estudos referentes aos corpos celestes mais distantes do planeta Terra, a sonda New Horizons foi lançada pela NASA em 19 de janeiro de 2006. A missão não tripulada teve como destino o Cinturão de Kuiper, região longínqua do sistema solar que abriga o planeta anão Plutão. Nossa pesquisa procurou informações a respeito da sonda New Horizons, entre elas destacam-se quais foram suas prioridades de pesquisa e possíveis benefícios para a astronomia, com o principal intuito de participar da IV Mostra de Astronomia do Espírito Santo e apresentar aos estudantes de nossa escola. Ademais aplica-se também para o público em geral, que não possui contato com astronomia. Neste artigo discutimos quais foram os dados coletados pela sonda durante a passagem por Plutão, além de retomar alguns conceitos e teorias da astronomia e apresentar algumas perspectivas futuras.

Abstract

With the objective of advancing in the studies referring to the most distant celestial bodies from planet Earth, the New Horizons probe was launched by NASA on January 19, 2006. The unmanned mission was destined to the Kuiper Belt, a remote region of the Solar System that home to the dwarf planet Pluto. Our research sought informations about the New Horizons spacecraft, among which were its research priorities and possible benefits for astronomy, with the main objective of participating in the IV Astronomy Exhibition of Espírito Santo and presenting to the students of our school. In addition, it also applies to the general public, who have no contact with astronomy. In this article, we discuss the data collected by the probe during its passage by Pluto, in addition to resuming some astronomy concepts and theories and presenting some future perspectives.

Palavras-chave: Plutão, New Horizons, Cinturão de Kuiper.

Keywords: Pluto, New Horizons, Kuiper Belt.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37361](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37361)

1 Introdução

Plutão é um dos mais distantes corpos do sistema solar. Ele já foi considerado planeta durante muito tempo, e hoje é classificado como planeta-anão. Ele foi objeto de uma das mais fascinantes investigações já realizadas por uma sonda espacial, a New Horizons que revelou aspectos que eram até pouco tempo atrás pouco conhecidas.

O nome Plutão foi sugerido por Venetia Burney uma menina de 11 anos, após vencer um concurso que tinha essa finalidade. Ela era interessada em mitologia clássica assim como em astronomia, e escolheu o nome do Deus romano do submundo, pelo fato do astro estar distante e ser escuro. Plutão foi tido como nono planeta do sistema solar, e sua existência já era especulada antes mesmo de ser detectado diretamente. A partir das obser-

vações de Percival Lowell (1855-1916), em 1905, inicia-se a busca pela confirmação desse nono planeta, mas é só em 1930 que um jovem astrônomo do Observatório Lowell no Arizona, Clyde Tombaugh (1906-1997), conseguiu detectar e fotografar Plutão, levando assim os créditos pela descoberta. Na Figura 1, é mostrado diferentes imagens de Plutão obtidas desde 1930.

Plutão está localizado na região denominada Cinturão de Kuiper, que abriga milhões de outros corpos celestes. Plutão foi considerado durante décadas um planeta do sistema solar. Contudo, em agosto de 2006, a União Astronômica Internacional (IAU, na sigla em inglês) o classificou como um planeta-anão [1]. Para ser considerado planeta é preciso atender três critérios: esteja em órbita em redor do Sol; tenha massa suficiente para que esteja em equilíbrio hidrostático e te-

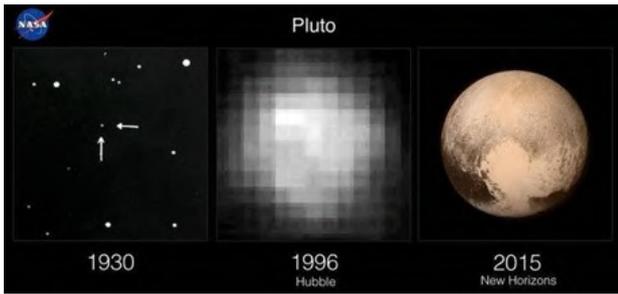


Figura 1: Evolução das imagens capturadas de Plutão ao longo dos anos. Créditos: NASA.

nha uma forma quase esférica; não tenha a vizinhança de outros corpos celestes que afetem sua órbita (órbita limpa). Plutão não cumpre com o terceiro item pois uma de suas luas, Caronte, possui massa parecida com a sua, o que faz o sistema Plutão-Caronte ser praticamente um sistema planetário duplo.

Para aprofundar os estudos sobre esse distante planeta-anão, do qual até então só possuíamos imagens coletadas por telescópios, entre eles o telescópio espacial Hubble, a sonda New Horizons foi lançada em 19 de janeiro de 2006, com os seguintes objetivos: fazer sobrevoo de Plutão; coletar dados e imagens até impensáveis devido à distância da Terra; observar as luas do planeta anão. Toda a missão foi coordenada pelo cientista planetário, Alan Stern. A sonda realizou um estudo de seis meses de reconhecimento sobre Plutão e suas luas já em 2015, culminando com a aproximação e menor distância de Plutão em 14 de julho de 2015.

Após cumprir com excelência a coleta de dados e imagens de Plutão e suas luas, a sonda teve uma extensão da missão para outros objetivos no Cinturão de Kuiper. O dia primeiro de Janeiro 2019 já é um marco para a exploração espacial: foi quando a sonda New Horizons passou pelo corpo celeste conhecido como Arrokoth (Última Thule) nos confins do sistema solar. O sobrevoo estabeleceu um novo recorde para objetos celestes: ele é o corpo celeste mais distante já explorado diretamente, a cerca de 6,5 bilhões de quilômetros da Terra.

Nossa pesquisa é bibliográfica,¹ desenvolvida

¹A pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos. Embora em quase todos os estudos seja exigido algum tipo de trabalho dessa natureza, há pesquisas desenvolvidas exclusivamente a partir de fontes bibliográficas [2].

com base em material já publicado [3]. Realizamos pesquisas em *websites*, canais de vídeos, e artigos encontrados, utilizando como referência metodológica a Ref. [2]. Na próxima seção falaremos sobre o lançamento e o trampolim gravitacional realizado pela sonda em sua passagem por Júpiter, na seção 3 sobre os equipamentos de pesquisa presentes na sonda. Na seção 4 sobre a chegada da New Horizons a Plutão e suas luas. Na seção 5 discutiremos a extensão da missão pelo Cinturão de Kuiper e, na última seção, apresentamos nossas conclusões.

2 Lançamento e trampolim gravitacional

A sonda New Horizons foi lançada em 19 de janeiro de 2006. Foi e ainda é o objeto construído por humanos mais veloz já enviado da Terra. O principal objetivo da sonda era estudar o planeta anão Plutão, que nunca havia sido observado de perto, o que cumpriu com sucesso. Antes disso, foi capaz de observar os fracos anéis de Júpiter e percorrer de forma única o sistema solar.

Atualmente, a sonda está muito distante da Terra, o que torna até difícil imaginar, ou mensurar, essa distância que hoje é de aproximadamente 50 vezes a distância entre a Terra e o Sol (50 UA) [3].² Usando uma combinação de foguete monopropulsor e assistência/trampolim gravitacional,³ ela passou pela órbita de Marte em 7 de abril de 2006, por Júpiter em 28 de fevereiro de 2007 onde utilizou o planeta para o que chamamos de assistência gravitacional para que a sonda ganhasse velocidade. Passou pela órbita de Saturno em 8 de junho de 2008 e pela de Urano em 18 de março de 2011, por último cruzou a órbita de Netuno em 25 de agosto de 2014, dirigindo-se, por fim, ao seu objetivo principal: passar por Plutão (Figura 2).

Em dezembro de 2014, a sonda encontrava-se a uma distância de aproximadamente 32 UA da Terra e 2 UA de Plutão, após sair de seu estado final de hibernação eletrônica em 7 de dezembro. Desde seu lançamento em 2006, a sonda passou

²A chamada unidade astronômica (UA) é utilizada para distâncias dentro do sistema solar e corresponde à distância média da Terra ao Sol, 1 UA \sim 150.000.000 quilômetros [4].

³Termo utilizado para a utilização do movimento relativo e a gravidade de um planeta ou outro corpo celeste objetivando a alteração da trajetória e da velocidade de uma espaçonave [4].

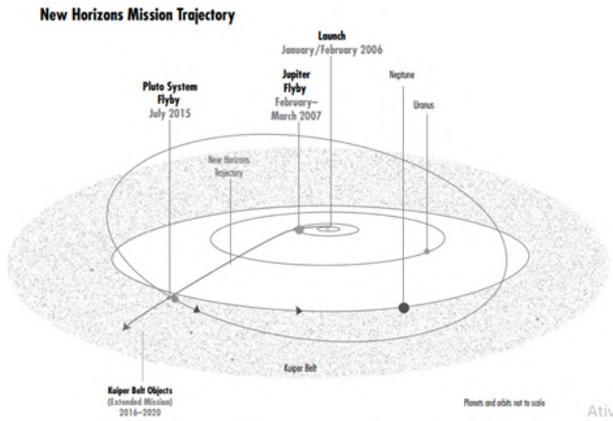


Figura 2: Exemplificação da trajetória da sonda desde o lançamento em 2006 até a exploração de objetos do Cinturão de Kuiper. Créditos: NASA.

1.873 dias hibernando no espaço com a quase totalidade de seus equipamentos desligados, dois terços do tempo total de sua jornada [3]. As primeiras observações de Plutão, mesmo que ainda à distância, iniciaram-se em 15 de janeiro de 2015. A sonda sobrevoou Plutão em 14 de julho de 2015, após nove anos e meio de viagem interplanetária, alcançando o seu ponto mais próximo da superfície do planeta, cerca de 12.500 km de distância, a uma velocidade de 45.000 km/h.

3 Sonda New Horizons

A sonda espacial tem as dimensões e a aparência de um prisma triangular em forma de caixa [3], de medidas aproximadas de 70, 210 e 270 centímetros de lado. Possui uma enorme antena parabólica com 250 centímetros de diâmetro e um gerador termoelétrico de radioisótopos de formato cilíndrico (Figura 3). A sonda possui uma massa de aproximadamente 478 kg, incluindo 77 kg de hidrazina⁴ e 30 kg de instrumentos científicos. Toda a estrutura é coberta de material térmico e as comunicações com a sonda são efetuadas na faixa de micro-ondas. Na passagem por Plutão a taxa de transferência de dados foi de 1 a 2 KBytes/segundo para se comunicar com as antenas de espaço profundo da NASA.

Abaixo destacamos os principais instrumentos de pesquisas e suas respectivas funcionalidades [3].

⁴Composto químico usado, entre outras aplicações, como propelente/combustível para satélites/sondas artificiais.

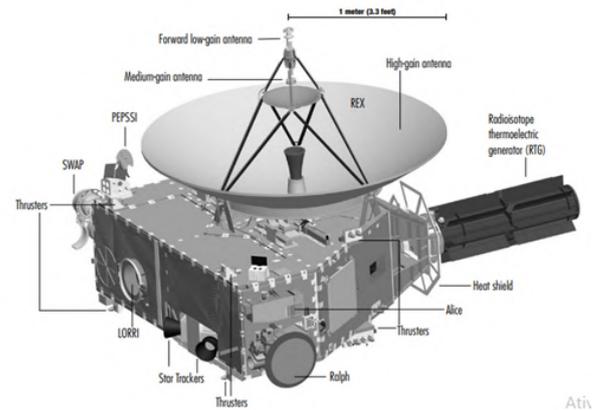


Figura 3: Exemplificação da sonda com seus instrumentos de pesquisa. Créditos: NASA.

- Long Range Reconnaissance Imager (LORRI) – É uma câmera de longa distância focal projetada para dar “responsividade” (dar respostas rápidas) e uma excelente resolução em comprimentos de ondas visíveis. O instrumento é equipado com um sensor monocromático, que funciona a uma temperatura abaixo de zero sendo mantida por um radiador na face anti-solar da sonda. Esse diferencial de temperatura requer isolamento térmico e físico do resto da sonda.
- Ralph - O Ralph foi responsável por criar mapas das superfícies de Plutão e Caronte com uma resolução de até 250 m por pixel, bem como mapear a composição das superfícies dos dois corpos. O instrumento consiste em um telescópio de 6 cm de abertura, com estruturas que registram a luz em dois canais separados: a câmara de imagem visível que tem quatro dispositivos para imagens coloridas, três para imagens pancromáticas (preto e branco); a matriz de imagens espectrais que atua na faixa da luz visível e a LEISA no infravermelho.
- Alice - É um espectrômetro de imagens ultravioleta (trabalha na faixa de luz ultravioleta) para estudar a atmosfera de Plutão. O dispositivo pode ser operado em dois modos: o modo *airglow*, em que as emissões da atmosfera são medidas, e o modo ocultação, que aponta o instrumento para o Sol, ou para outro astro luminoso, através da atmosfera de Plutão, para determinar a sua composição através da análise de como a luz é absorvida.

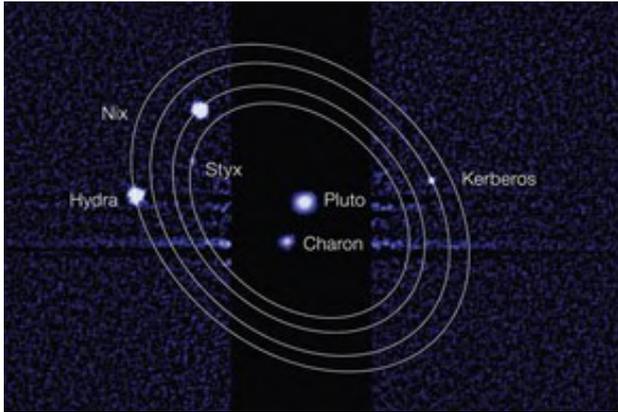


Figura 4: Imagem sistema de Plutão e suas 5 luas. Créditos: NASA, ESA, L. Frattare STScI. Fonte: [Life, Unbounded/Scientific American](#).

- Pluto Energetic Particle Spectrometer Science Investigation (PEPSSI) - É um espectrômetro de íons e elétrons para procurar átomos neutros que escapam da atmosfera de Plutão e são eletricamente carregados pelo vento solar.⁵
- SWAP - Tem a finalidade de medir a interação de Plutão com o vento solar.
- Radio Science Experiment (REX) - Consiste em um pequeno circuito integrado que contém um sofisticado sistema de transmissão e captação de sinais de rádio. A sonda possui duas cópias do REX e pode utilizar ambas simultaneamente. As finalidades deste instrumento são a de medir a temperatura da atmosfera e a sua pressão, medir a densidade da ionosfera e procurar por atmosfera em Caronte.
- Venetia Burney Student Dust Counter (VBSDC) - Consiste em um medidor de poeira interestelar, construído por estudantes da Universidade do Colorado em Boulder, que opera todo o tempo da viagem fazendo a medição de poeira. Nomeado em homenagem à menina que deu nome ao planeta em 1930.

⁵O vento solar é um fluxo contínuo de partículas constituído, principalmente, de prótons e elétrons, essas partículas são energizadas por altas temperaturas na coroa solar e escapam da atração gravitacional do Sol.



Figura 5: Imagem da lua Caronte enviada pela sonda New Horizons. Créditos: NASA.

4 Chegada a Plutão

A sonda sobrevoou Plutão em 14 de julho de 2015, enviando uma vasta quantidade de dados e imagens sobre o planeta e seus satélites naturais [3]. O maior deles é Caronte (Charon), um satélite com aproximadamente metade do tamanho de Plutão e os outros quatro satélites foram nomeados de Nyx (Nix), Hydra (Hidra), Kerberos (Cérbero) e Styx (Estige) que são menores em dimensões comparados às de Caronte (Figura 4).

Seguem algumas das informações [5] relevantes adquiridas durante a missão, e que forma destacadas neste trabalho.

1. Caronte, lua que fica a mais ou menos 1.200 km de Plutão, e tem cerca da metade de seu diâmetro, graças a sonda foi possível perceber nesta lua uma vasta riqueza de detalhes e uma forma bem peculiar, oval e com bastantes depressões na superfície (Figura 5);
2. Plutão com 2.370 km de diâmetro (este é o seu real tamanho) sendo maior do que muitos especialistas estimaram no passado;
3. Hydra, descoberta pelo telescópio espacial Hubble em 2005, a lua tem um formato diferente da maioria dos demais corpos celestes, uma vez que não é exatamente circular, com o formato de uma batata de dimensões aproximadas de 43 km por 33 km;



Figura 6: Imagem da aproximação de Plutão enviada pela sonda New Horizons. Créditos: NASA.

4. As imagens de 15 de julho 2015 revelaram a existência de montanhas congeladas na superfície de Plutão, os dados do dia 17 de julho 2015 trouxeram imagens de extensas planícies de gelo no planeta, onde não há crateras (Figura 6);
5. A atmosfera de Plutão é rica em nitrogênio e se estende por até 1.600 km acima de sua superfície;
6. Nyx o menor satélite natural de Plutão, foi avistado pela sonda, e mesmo com baixa resolução foi possível determinar que a lua tem apenas 6 km de diâmetro.

5 Percurso pelo Cinturão de Kuiper

Após passar por Plutão, a New Horizons teve sua missão estendida para objetos do Cinturão Kuiper. O escolhido foi o Arrokoth (Última Thule) que está aproximadamente a 45 UA da Terra. A primeira série de dados transmitidos pela sonda revelou um mundo em duas partes, um objeto no formato de um boneco de neve. A passagem pelo objeto ocorreu em 1^o de janeiro de 2020, e as fotos foram tiradas dez minutos após um sobre voo de 8.800 km, revelando características únicas.

A New Horizons se encontra hoje a aproximadamente 50 UA da terra, os comandos demoram

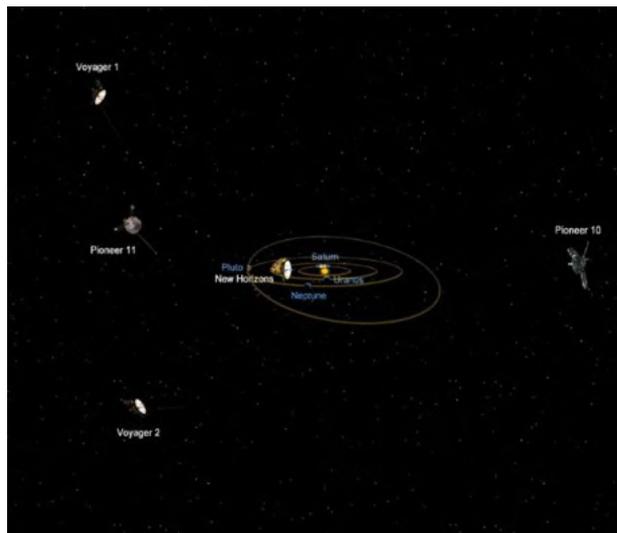


Figura 7: Representação da localização das sondas New Horizons, Pioneer 10 e 11, e Voyager 1 e 2, em relação ao sistema solar. Créditos: NASA, JPL-Caltech. Fonte: [Astronoo](#).

cerca de 7 horas para chegar até a sonda, e 14 horas para fazer o percurso de ida e volta. Ela está aguardando novos objetivos, já tem o status de quinta sonda mais distante no espaço, ficando atrás apenas das Pioneer 10 e 11 e das Voyager 1 e 2 (Figura 7). Em 25 de Dezembro de 2020 a New Horizons foi apontada para a direção da Voyager 01 que está 152 UA da Terra, já no espaço interestelar, e conseguiu assim fotografar exatamente o local em que se encontra a outra sonda, realizando algo jamais visto no contexto da exploração espacial.

6 Conclusão

Após todo o trabalho realizado para a junção de material e informações que foram utilizadas na apresentação na Mostra de Astronomia do Espírito Santo, pode-se concluir que as pesquisas em torno desse assunto ainda são recentes, muitos dados estão sendo tratados, a sonda está ativa e podemos esperar ainda grandes avanços.

Esta pesquisa proporcionou pelo segundo ano consecutivo a participação efetiva de nossa escola no universo da astronomia. Com objetivo de apresentar aos estudantes da EMEF “Prefeito Roberto Calmon” um pouco do que é pesquisado e publicado sobre o tema, estamos criando em nossa escola uma cultura de divulgação científica.

Conforme os anos passam, novas tecnologias são implementadas nas sondas com o intuito de

melhorar as formas de detecção e os dados obtidos. Ademais, podemos ver o quando não sabíamos sobre o planeta anão Plutão e seu entorno. Por fim, com as recentes publicações disponíveis no site da NASA, foi possível entender que, a sonda New Horizons foi, e continua sendo, uma ferramenta muito útil para facilitar as descobertas científicas.

Agradecimentos

A todos os funcionários da EMEF “Prefeito Roberto Calmon” pelo empenho de dedicação para que os alunos pudessem representar a escola na terceira etapa em Guarapari, à diretora Maria Neliceia Barnardo Barboza pelo incentivo e suporte desde o início dos trabalhos com Astronomia em 2020 e à aluna do curso de letras da UFES Aline Marques Ferreira pela correção ortográfica do artigo.

Sobre os autores

Roger da Trindade Gomes (rogertrindadeufes@gmail.com), professor orientador do presente trabalho, é Mestre em Ensino de Matemática (2021) pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e Licenciado em Matemática (2011) e Física (2018) pela mesma instituição. Possui Especialização em Educação de Jovens e Adultos (2013) pelo Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). Atualmente é professor de matemática na Escola SESI de Linhares-ES e na EMEF “Prefeito Roberto Calmon”, com interesse em pesquisas voltadas para o uso de tecnologia na educação e astronomia.

Ágata Mayra de Souza Batista (agathamayrabatista@gmail.com), Kéwysen Bruno Marcullino Feu (kewysonb@gmail.com), Julia Oliveira

de Souza (juliaoliveiradesouza16@gmail.com) e Thaís Santos Dias (armybomb681@gmail.com) concluíram o Ensino Fundamental no ano de 2021 na Escola EMEF “Prefeito Roberto Calmon” em Linhares-ES. Integraram a lista de participantes da MAES 2021, vencendo na categoria 9º Ano do Ensino Fundamental. Além disso continuam realizando pesquisas sobre temas de astronomia como bolsistas do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq).

Referências

- [1] União Astronômica Internacional, *Resolution B5: Definition of a Planet in the Solar System*, Resolução B5 (2006). Disponível em https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf, acesso em ago. de 2021.
- [2] A. C. Gil, *Como elaborar projetos de pesquisa* (Atlas, São Paulo, 2002), 4ª ed.
- [3] *New Horizons: The First Mission to the Pluto System and the Kuiper Belt*, NASA. Disponível em https://www.nasa.gov/mission_pages/newhorizons/overview/index.html, acesso em jul. de 2021.
- [4] K. S. O. Filho e M. F. O. Saraiva, *Astronomia & Astronfísica* (Livraria da Física, São Paulo, 2014), 3ª ed.
- [5] P. Gnipper, *Resumimos as principais descobertas da New Horizons sobre Plutão e suas luas*, Canaltech (2015). Disponível em <http://canaltech.com.br/ciencia/resumimos-as-principais-descobertas-da-new-horizons-sobre-plutao-e-suas-luas-52701/>, acesso em jun. de 2021.

O universo dinâmico de Friedmann

Hermano Velten¹ e Winfried Zimdahl²

¹Universidade Federal de Ouro Preto

²Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Apresenta-se uma tradução do alemão, do artigo seminal de Alexander Friedmann publicado em 1922, onde encontram-se as bases de um modelo cosmológico dinâmico.

Abstract

This is a translation from German to Brazilian Portuguese of the seminal work by Alexander Friedmann, published in 1922, where the basics of a dynamical cosmological model are developed

Palavras-chave: modelo de Friedmann, modelo cosmológico dinâmico.

Keywords: Friedmann's model, dynamical cosmological model.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n1.37322](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n1.37322)

1 Introdução

A cosmologia relativista é um ramo da ciência bem estabelecido que tenta fornecer respostas a algumas das questões que sempre perseguiram o homem, por exemplo, qual a origem e idade do universo? Apesar de intrigantes, estas perguntas só puderam ter suas respostas formuladas a partir dos trabalhos pioneiros de Albert Einstein, Willem de Sitter, Alexander Friedmann e Georges Lemaître há cerca de um século.

É justo dizer que Einstein é o fundador da cosmologia relativista, bem como de Sitter foi um de seus pioneiros. No entanto, o entendimento geral na época era que o universo fosse estático.

O artigo de Friedmann de 1922 que apresentamos aqui numa tradução do alemão¹ é o ponto de partida do conceito de um universo dinâmico em expansão e, junto com trabalhos de Georges Lemaître anos depois, forma a base da cosmologia relativista moderna. Curiosamente, Einstein inicialmente recusou as soluções de Friedmann encontradas neste artigo mas mais tarde teve que corrigir sua posição.

¹Existe um manuscrito do artigo escrito em russo, disponível no site do [Insituto Lorentz](#), Universidade de Leiden, Holanda. No entanto, o trabalho foi publicado na revista alemã *Zeitschrift für Physik* e, portanto, em alemão.

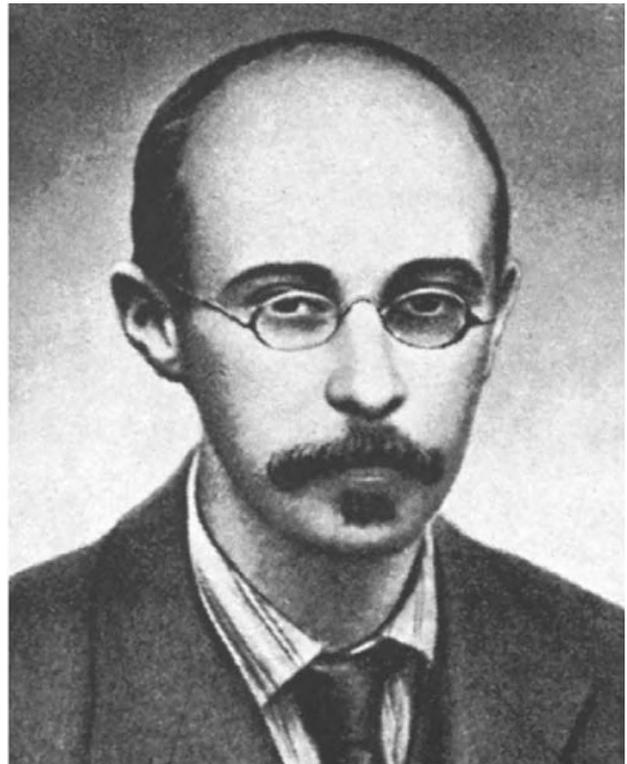


Figura 1: Foto de Alexander Friedmann. Crédito: domínio público. Fonte: [Wikimedia Commons](#).

Estas soluções tratavam-se, à época, de uma interpretação especulativa da possível dinâmica cósmica e o artigo de Friedmann passou despercebido pelos astrônomos da época.

De fato, apenas ao longo da década de 1920 o conceito de galáxia emergiria, culminando nas observações de Hubble, em 1929, que constatariam a expansão do universo. Maiores detalhes desta história podem ser encontrados no texto de Ioav Waga nesta mesma edição do Cadernos de Astronomia.

Sobre o texto de Friedmann de 1922, aqui traduzido para o português, destaca-se a objetividade matemática de Friedmann e sua astúcia científica por tentar encontrar soluções bem genéricas de tal forma que as soluções de Einstein e de de Sitter seriam casos particulares de seu trabalho.

Um aspecto interessante no final do artigo é uma estimativa tentativa do idade do universo. Friedmann chega a 10 bilhões de anos o que é bem da ordem do valor preferido na cosmologia atual.

Ao nosso conhecimento, trata-se da primeira tradução do trabalho de Friedmann para o português. Apesar de já existirem traduções deste trabalho para o idioma inglês, acreditamos que esta nossa tradução possa ser útil para estudantes da área que tem pouca oportunidade de ter contato com os textos clássicos originais da área.

A tradução apresentada a seguir tenta se man-

ter o mais próximo possível da diagramação do artigo original de Friedmann. Acreditamos que tal estratégia colabora para a experiência de se estar estrando em contato com um texto tão icônico quanto este.

Sobre os tradutores

Hermano Endlich Schneider Velten (hermano.velten@ufop.edu.br) é professor da UFOP. É doutor em física pela UFES e bolsista de produtividade do CNPq. Fez estágios de pós-doutoramento na Alemanha e França. O foco de suas pesquisas encontra-se nas áreas de astrofísica e cosmologia.

Winfried Zimdahl (winfried.zimdahl@gmail.com) é pesquisador do Núcleo Cosmo-ufes e um dos fundadores do PPGCosmo. Doutorou-se pela Universidade de Rostock, Alemanha, em 1975, com uma tese sobre física estatística. Autor de quase cem artigos científicos, foi citado recentemente na lista dos pesquisadores mais influentes do mundo, elaborada pela Universidade de Stanford (EUA). Desenvolve pesquisas em cosmologia e gravitação, com especial ênfase nos estudos do setor escuro do universo. Orientou mais de uma dezena de estudantes de mestrado e doutorado.

Sobre a curvatura do espaço[†]

A. Friedmann - Petersburgo (recebido em 29 de junho de 1922)

§ 1. 1. Em seus conhecidos trabalhos sobre as questões cosmológicas gerais, Einstein¹⁾ e de Sitter²⁾ chegam a dois possíveis tipos de universo; Einstein obtém o chamado universo cilíndrico³⁾ em que o espaço possui uma curvatura constante, independente do tempo, de forma que o raio de curvatura está relacionado à massa total da matéria presente no espaço; de Sitter obtém um universo esférico, em que não apenas o espaço, mas também o universo, pode ser tratado, de certa forma, como um universo de curvatura constante⁴⁾. Tanto Einstein quanto de Sitter fazem certas hipóteses sobre o tensor de matéria-energia, que correspondem a incoerência da matéria e seu repouso relativo, no sentido de que a velocidade da matéria é suficientemente pequena comparada à velocidade base, a velocidade da luz.⁵⁾

O objetivo desta nota é, primeiramente, obter o universo cilíndrico e esférico (como casos especiais) a partir de premissas gerais e, em segundo lugar, demonstrar a possibilidade de um universo cuja curvatura espacial seja constante em relação às três coordenadas que são consideradas coordenadas espaciais e dependente do tempo, que seria a quarta coordenada - a coordenada temporal; este novo tipo é, no que diz respeito às suas outras propriedades, um análogo do universo cilíndrico de Einstein.

2. As suposições nas quais baseamos nossas considerações recaem em duas classes. A primeira classe inclui suposições que coincidem com as suposições de Einstein e de Sitter; elas se relacionam com as equações que os potenciais gravitacionais satisfazem, e com o estado e o movimento do matéria. A segunda classe inclui suposições sobre o, por assim dizer, caráter geral geométrico do mundo. A partir da nossa hipótese obtém-se, como caso especial, o universo cilíndrico de Einstein e também o universo esférico de de Sitter.

As hipóteses da primeira classe são as seguintes:

1. Os potenciais gravitacionais satisfazem o sistema de equações de Einstein com o termo cosmológico, que também pode ser posto igual a zero:

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}\bar{R} + \lambda g_{ik} = -\kappa T_{ij} \quad (i, k = 1, 2, 3, 4). \quad (\text{A})$$

Aqui g_{ik} são os potenciais gravitacionais, T_{ik} o tensor de matéria, κ - uma constante, $\bar{R} = g^{ik}R_{ik}$; R_{ik} é determinado através das equações

$$R_{ik} = \frac{\partial^2 l g}{\partial x_i \partial x_k} \sqrt{g} - \frac{\partial l g \sqrt{g}}{\partial x_\sigma} \left\{ \begin{matrix} ik \\ \sigma \end{matrix} \right\} - \frac{\partial}{\partial x_\sigma} \left\{ \begin{matrix} ik \\ \sigma \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} i\alpha \\ \sigma \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} k\sigma \\ \alpha \end{matrix} \right\}, \quad (\text{B})$$

onde os x_i ($i = 1, 2, 3, 4$) são as coordenadas de mundo, e $\left\{ \begin{matrix} ik \\ l \end{matrix} \right\}$ os símbolos de Christoffel de segundo tipo⁶⁾.

[†]Título original: *Über die Krümmung des Raumes*. Publicado em: *Zeitschrift für Physik* **10**, 377 (1922).

¹Einstein, *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitzungsberichte Berl. Akad. 1917.

²de Sitter, *On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences*. *Monthly Notices of the R. Astronom. Soc.* 1916–1917.

³Sobre “espaço” entendemos aqui um espaço que pode ser descrito como uma variedade em três dimensões; o “universo” equivale a uma variedade de quatro dimensões.

⁴Klein, *Über die Integralform der Erhaltungssätze und die Theorie der räumlich-geschlossenen Welt*. Götting. *Nachr.* 1918

⁵Veja este nome no livro de Eddington, *Espace, Temps et Gravitation*, 2 Partie, S. 10. Paris 1921.

⁶Nossa escolha do sinal de R_{ik} e de \bar{R} é diferente do normal.

2. A matéria é incoerente e em repouso relativo; ou, sendo direto e menos rigoroso, a velocidade relativa da matéria é desprezível em comparação com a velocidade da luz. No que segue a estas hipóteses o tensor de matéria é dado pelas equações

$$\begin{aligned} T_{ik} &= 0 \quad \text{para } i \text{ e } k \neq 4, \\ T_{44} &= c^2 \varrho g_{44}, \end{aligned} \tag{C}$$

aqui ϱ é a densidade da matéria e c a velocidade base; fora isso, as coordenadas de mundo são divididas em três coordenadas espaciais x_1, x_2, x_3 e a coordenada temporal x_4 .

3. As hipóteses da segunda classe são as seguintes:

1. Em termos das coordenadas espaciais em x_1, x_2, x_3 teremos um espaço de curvatura constante, mas que pode depender de x_4 - a coordenada temporal. O intervalo⁷⁾ ds , determinado através de $ds^2 = g_{ik} dx_i dx_k$, pode, ao se introduzir coordenadas espaciais adequadas, ser colocado na seguinte forma:

$$\begin{aligned} ds^2 &= R^2(dx_1^2 + \sin^2 x_1 dx_2^2 + \sin^2 x_1 \sin^2 x_2 dx_3^2) \\ &+ 2g_{14} dx_1 dx_4 + 2g_{24} dx_2 dx_4 + 2g_{34} dx_3 dx_4 + g_{44} dx_4^2. \end{aligned}$$

Aqui R depende apenas de x_4 ; R é proporcional ao raio de curvatura do espaço que pode, portanto, variar com o tempo.

2. Na expressão para ds^2 é possível, através de uma escolha apropriada de coordenadas, eliminar g_{14}, g_{24}, g_{34} , em outras palavras, o tempo é ortogonal ao espaço. Sobre esta segunda hipótese, ao que me parece, podem não existir motivos físicos ou filosóficos; ela serve apenas para simplificar os cálculos. É preciso observar que os universos de Einstein e de de Sitter, dentro de nossas hipóteses, são casos especiais.

Seguindo as hipóteses 1 e 2, ds^2 pode ser colocado na forma

$$ds^2 = R^2(dx_1^2 + \sin^2 x_1 dx_2^2 + \sin^2 x_1 \sin^2 x_2 dx_3^2) + M^2 dx_4^2, \tag{D}$$

onde R é uma função de x_4 e M , no caso geral, depende das quatro coordenadas. O universo de Einstein será obtido ao se substituir R^2 por $-\frac{R^2}{c^2}$ e, além disso, colocar M igual a 1 em (D), onde R significa o constante (independente de x_4) raio de curvatura do espaço.

O universo de de Sitter será obtido ao se substituir R^2 por $-\frac{R^2}{c^2}$ e M por $\cos x_1$ em (D):

$$d\tau^2 = -\frac{R^2}{c^2}(dx_1^2 + \sin^2 x_1 dx_2^2 + \sin^2 x_1 \sin^2 x_2 dx_3^2) + dx_4^2, \tag{D1}$$

$$d\tau^2 = -\frac{R^2}{c^2}(dx_1^2 + \sin^2 x_1 dx_2^2 + \sin^2 x_1 \sin^2 x_2 dx_3^2) + \cos^2 x_1 dx_4^2. \tag{D2}$$

4. Precisamos agora ter o compromisso de encontrar os limites nos as coordenadas de mundo estão confinadas, ou seja, quais os pontos da variedade quadridimensional vamos tratar como sendo diferentes. Sem nos ater a uma explicação mais detalhada, vamos supor que as coordenadas espaciais estão dentro dos seguintes intervalos: x_1 no intervalo $(0, \pi)$; x_2 no intervalo $(0, \pi)$ e x_3 no intervalo $(0, 2\pi)$; com respeito à coordenada de tempo não vamos fazer por enquanto nenhuma suposição limitadora, mas vamos considerar esta questão mais abaixo.

§2.1. Das hipóteses (C) e (D) segue que, quando fazemos $i = 1, 2, 3$ e $k = 4$ nas equações (A),

$$R'(x_4) \frac{\partial M}{\partial x_1} = R'(x_4) \frac{\partial M}{\partial x_2} = R'(x_4) \frac{\partial M}{\partial x_3} = 0;$$

⁷Veja, por exemplo, Eddington, *Espace, Temps et Gravitation*, 2 Partie. Paris 1921.

⁸O ds^2 , do qual se supõe que possui dimensão de tempo, designaremos como $d\tau$, então a constante κ terá a dimensão de comprimento/massa e no sistema c.g.s é igual a $1,87 \times 10^{-27}$. Veja Laue, *Die Relativitätstheorie*, Bd. II, S. 185. Braunschweig 1921.

o que resulta em dois casos: (1.) $R'(x_4) = 0$, R é independente de x_4 , queremos descrever esse universo como estacionário; (2.) $R'(x_4) \neq 0$, M depende apenas de x_4 , este deve se chamar de universo não estacionário.

Vamos considerar primeiramente o universo estacionário e escrevemos as equações (A) para $i, k = 1, 2, 3$ e, além disso, $i \neq k$, obtendo o seguinte sistema de fórmulas:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M}{\partial x_1 \partial x_2} - \cot g x_1 \frac{\partial M}{\partial x_2} &= 0, \\ \frac{\partial^2 M}{\partial x_1 \partial x_3} - \cot g x_1 \frac{\partial M}{\partial x_3} &= 0, \\ \frac{\partial^2 M}{\partial x_2 \partial x_3} - \cot g x_2 \frac{\partial M}{\partial x_3} &= 0. \end{aligned}$$

A integração destas equações entrega a seguinte expressão para M:

$$M = A(x_3, x_4) \sin x_1 \sin x_2 + B(x_2, x_4) \sin x_1 + C(x_1, x_4), \tag{1}$$

onde A, B, C são funções arbitrárias de seus argumentos. Resolvendo as equações (A) para R_{ik} e eliminamos a densidade desconhecida ρ das, até então não utilizadas equações⁹), obtemos, utilizando para M a expressão (1), depois de longos mas elementares cálculos, duas possibilidades para M:

$$M = M_0 = const, \tag{2}$$

$$M = (A_0 x_4 + B_0) \cos x_1, \tag{3}$$

onde M_0, A_0, B_0 significam constantes.

Se M é uma constante, então o universo estacionário é o universo cilíndrico. É então vantajoso trabalhar com os potenciais gravitacionais da fórmula (D_1); determinamos a densidade ρ e a quantidade λ , assim é obtido o conhecido resultado de Einstein:

$$\lambda = \frac{c^2}{R}, \quad \rho = \frac{2}{\kappa R^2}, \quad \bar{M} = \frac{4\pi^2}{\kappa} R,$$

onde \bar{M} significa a massa total do espaço.

No segundo caso possível, quando \bar{M} é dado por meio de (3), chegamos, com uma transformação razoável de x_4 ¹⁰), ao universo esférico de de Sitter no qual $M = \cos x_1$; Com a ajuda de (D_2) obtemos as relações de de Sitter:

$$\lambda = \frac{3c^2}{R}, \quad \rho = 0, \quad \bar{M} = 0.$$

Nós temos então o seguinte resultado: o universo estacionário será ou o universo cilíndrico de Einstein ou o universo esférico de de Sitter.

2. Nós queremos considerar agora o universo não estacionário. Atualmente, M é uma função de x_4 ; com uma escolha adequada de x_4 pode-se encontrar (sem perda de generalidade) que $M = 1$; Para ligar a nossas ideias comuns, colocaremos ds^2 em uma forma que é análoga a (D_1) e (D_2):

$$d\tau^2 = -\frac{R^2(x_4)}{c^2} (dx_1^2 + \sin^2 x_1 dx_2^2 + \sin^2 x_1 \sin^2 x_2 dx_3^2) + dx_4^2. \tag{D_3}$$

Nossa tarefa agora é determinar R e ρ a partir das equações (A). É claro que as equações (A) com índices diferentes não fornecem nada; as equações (A) para $i = k = 1, 2, 3$ fornecem a relação:

⁹A densidade ρ é uma função desconhecida das coordenadas de mundo x_1, x_2, x_3, x_4 .

¹⁰Esta transformação é obtida por meio da fórmula $d\bar{x}_4 = \sqrt{A_0 x_4 + B_0} dx_4$.

$$\frac{R'^2}{R^2} + \frac{2RR''}{R^2} + \frac{c^2}{R} - \lambda = 0, \tag{4}$$

a equação (A) com $i = k = 4$ fornece a relação:

$$\frac{3R'^2}{R^2} + \frac{3c^2}{R} - \lambda = \kappa c^2 \varrho, \tag{5}$$

com

$$R' = \frac{dR}{dx_4} \quad \text{e} \quad R'' = \frac{d^2R}{dx_4^2}.$$

Sendo $R' \neq 0$, então a integração da equação (4) dá, quando escrevemos t para x_4 , a equação:

$$\frac{1}{c^2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{A - R + \frac{\lambda}{3c^2} R^3}{R}, \tag{6}$$

onde A é uma constante arbitrária. A partir desta equação obtemos R por meio de uma inversão de uma integral elíptica, quer dizer, com a resolução para R da equação

$$t = \frac{1}{c} \int_0^R \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2} x^3}} dx + B, \tag{7}$$

na qual B e A são constantes, onde que deve-se levar em consideração as condições comuns da mudança de sinal da raiz quadrada. Da equação (5) tem-se como determinar ϱ :

$$\varrho = \frac{3A}{\kappa R^3}; \tag{8}$$

através da massa total \bar{M} do espaço a constante A se exprime da seguinte maneira

$$A = \frac{\kappa \bar{M}}{6\pi^2}. \tag{9}$$

Se \bar{M} é positivo, então A é positivo.

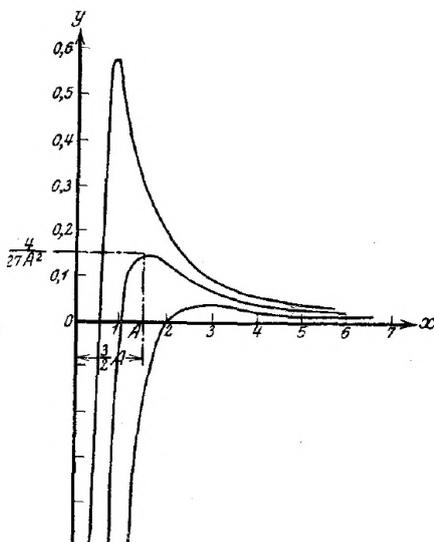
3. Para considerar um universo não estacionário devemos ter como base as equações (6) e (7); e ainda, a quantidade λ não está determinada; Nós vamos aceitar que ela pode assumir valores arbitrários.

Vamos determinar agora aqueles valores da variável x para os quais a raiz quadrada da fórmula (7) pode mudar de sinal. Vamos restringir nossas considerações para raios de curvatura positivos, ou seja, para x no intervalo $(0, \infty)$ e neste intervalo, os valores de x que façam o radical ser igual a 0 ou ∞ . Um valor de x para o qual a raiz quadrada em (7) seja nula é $x = 0$; os valores restantes de x para quais a raiz quadrada em (7) muda de sinal são dados pelas raízes positivas da equação $A - x + \frac{\lambda}{3c^2} x^3 = 0$. Vamos denotar $\frac{\lambda}{3c^2}$ como y e consideramos no plano (x, y) a família de curvas de terceiro grau

$$yx^3 - x + A = 0. \tag{10}$$

A é um parâmetro da família que varia no intervalo $(0, \infty)$. As curvas da família (v. Fig.) cortam o eixo x no ponto $x = A, y = 0$ e tem um máximo no ponto

$$x = \frac{3A}{2}, \quad y = \frac{4}{27A^2}.$$



Da figura é visível que para valores negativos de λ a equação $A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3 = 0$ possui uma raiz positiva x_0 no intervalo $(0, A)$. Considera-se x_0 como uma função de λ e A :

$$x_0 = \theta(\lambda, A),$$

então encontra-se que θ é uma função crescente de λ e uma função crescente de A . Se λ está no intervalo $(0, \frac{4}{9} \frac{c^2}{A^2})$, a equação possui duas raízes positivas $x_0 = \theta(\lambda, A)$ e $x'_0 = \vartheta(\lambda, A)$, onde x_0 está no intervalo $(A, \frac{3A}{2})$ e x'_0 cai no intervalo $(\frac{3A}{2}, \infty)$; $\theta(\lambda, A)$ é uma função crescente tanto de λ quanto de A , $\vartheta(\lambda, A)$ uma função decrescente de λ e A . Finalmente, sendo λ maior que $\frac{4}{9} \frac{c^2}{A^2}$ a equação não possui raízes positivas.

Agora passamos a considerar a fórmula (7) e fazemos a seguinte observação preliminar: seja o raio de curvatura igual a R_0 para $t = t_0$; o sinal da raiz quadrada em (7) é positivo ou negativo, dependendo de que, se o raio de curvatura cresce ou decresce para $t = t_0$; substituímos, se necessário, t por $-t$, podemos sempre fazer a raiz quadrada positiva, ou seja, pela escolha do tempo sempre pode ser alcançado que o raio de curvatura para $t = t_0$ aumenta com o tempo.

4. Vamos considerar primeiro o caso $\lambda > \frac{4}{9} \frac{c^2}{A^2}$, ou seja, o caso onde a equação $A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3 = 0$ não possui nenhuma raiz positiva. A equação (7) então pode ser escrita

$$t - t_0 = \frac{1}{c} \int_{R_0}^R \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3}} dx, \tag{11}$$

onde, de acordo com nossas observações, a raiz quadrada é sempre positiva. Segue então que R é uma função crescente de t ; não há restrição sobre o valor inicial positivo R_0 .

Como o raio de curvatura não pode ser menor que zero, ele deve, com tempo decrescente t a partir de R_0 , alcançar o valor zero num instante t' .

O tempo para crescer em R de 0 até R_0 gostaríamos de chamar do tempo de criação do universo¹¹); esse tempo t' é fornecido por:

$$t' = \frac{1}{c} \int_0^{R_0} \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3}} dx. \tag{12}$$

Tal universo chamaremos de universo monotônico de primeiro tipo.

O tempo decorrido desde a criação do universo (monótono e de primeiro tipo), visto como uma função de R_0, A, λ , tem as seguintes propriedades: 1. ele cresce para um R_0 crescente; 2. ele decresce quando A cresce, quer dizer, a massa do espaço aumenta; 3. ele decresce quando λ cresce. Se $A > \frac{2}{3}R_0$ então para um λ arbitrário o tempo decorrido desde a criação do universo é finito; se $A \leq \frac{2}{3}R_0$ então pode-se sempre encontrar um tal valor $\lambda = \lambda_1 = \frac{4c^2}{9A^2}$ tal que quando λ se aproxima deste valor, o tempo desde a criação do universo aumenta sem restrições.

5. Agora esteja λ no intervalo $(0, \frac{4}{9} \frac{c^2}{A^2})$, então o valor inicial do raio de curvatura pode estar nos intervalos: $(0, x_0), (x_0, x'_0), (x'_0, \infty)$. Com R_0 no intervalo (x_0, x'_0) então a raiz quadrada da fórmula (7) é imaginária; um espaço com esta curvatura inicial é impossível.

Dedicaremos a próxima seção ao caso onde R_0 está no intervalo $(0, x_0)$; aqui consideramos ainda o terceiro caso: $R_0 > x'_0$ ou $R_0 > \vartheta(\lambda, A)$. Com considerações análogas às anteriores, pode-se mostrar que R é uma função crescente do tempo, onde R pode começar com o valor $x'_0 = \vartheta(\lambda, A)$. O tempo que se passou desde o instante quando $R = x'_0$ até o instante quando $R = R_0$ tomamos novamente como o tempo desde a criação do universo. Este será t' , tal que

$$t' = \frac{1}{c} \int_{x'_0}^{R_0} \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3}} dx. \tag{13}$$

¹¹O tempo desde a criação do universo é o tempo desde o instante onde o espaço era um ponto ($R = 0$) até o ponto atual ($R = R_0$); este tempo pode também ser infinito.

Tal universo chamaremos de universo monotônico de segundo tipo.

6. Nós vamos considerar agora o caso onde λ está dentro dos limites $(-\infty, 0)$. Se neste caso $R_0 > x_0 = \Theta(\lambda, A)$, a raiz quadrada in (7) se torna imaginária, o espaço com este R_0 é impossível. Sendo $R_0 < x_0$, trata-se do caso idêntico que desconsideramos na última seção. Nós assumiremos daqui para frente que λ está no intervalo $(-\infty, \frac{4c^2}{9A^2})$ e $R_0 < x_0$. Por meio de considerações conhecidas¹² pode-se mostrar que R se torna uma função periódica de t , com período t_π , a qual chamaremos de período do universo; t_π é dado pela fórmula

$$t_\pi = \frac{2}{c} \int_0^{x_0} \sqrt{\frac{x}{A - x + \frac{\lambda}{3c^2}x^3}} dx. \quad (14)$$

O raio de curvatura varia assim entre 0 e x_0 . Chamaremos este universo de universo periódico. O período do universo periódico aumenta quando aumenta-se λ e tende para o infinito quando λ tende para o valor $\lambda_1 = \frac{4^2}{c} 9A^2$.

Para pequenos λ o período pode ser aproximado pela fórmula

$$t_\pi = \frac{\pi A}{c}. \quad (15)$$

No que diz respeito ao mundo periódico, dois pontos de vista são possíveis: contamos dois eventos como coincidentes, quando suas coordenadas espaciais coincidem e a diferença entre as coordenadas temporais é um múltiplo inteiro do período, então o raio de curvatura aumenta do valor 0 até x_0 e então diminui até o valor 0; o tempo de existência do universo é finito; por outro lado, quando o tempo varia entre $-\infty$ e $+\infty$ (ou seja, consideramos dois eventos como coincidentes apenas quando não só as coordenadas espaciais mas também suas coordenadas de mundo coincidem), chegamos a uma periodicidade verdadeira da curvatura espacial.

7. Nossos conhecimentos são totalmente insuficientes para conduzir cálculos numéricos e decidir qual é o nosso universo; é possível que o problema da causalidade e o problema da força centrífuga joguem luz sobre esta questão. Ainda se observa que a grandeza “cosmológica” λ que aparece nas nossas fórmulas permanece indefinida, uma vez que trata-se de uma constante excedente na tarefa; possivelmente considerações da eletrodinâmica podem levar à sua avaliação. Se usarmos $\lambda = 0$ e $M = 5 \cdot 10^{21}$ massas solares, então o período do universo será da ordem de 10 bilhões de anos. Estes números podem apenas servir como uma ilustração da aplicação dos nossos cálculos.

Petrogrado, 29 de maio de 1922.

¹²Veja, por exemplo, Weierstrass, Über eine Gattung reell periodischer Funktionen. Monatsber. d. Königl. Akad. d. Wissensch. 1866 e Horn, Zur Theorie der kleinen endlichen Schwingungen. ZS. f. Math. und Physik 47, 400, 1902. No nosso caso as considerações destes autores devem ser alteradas apropriadamente. No entanto, a periodicidade no nosso caso pode ser estabelecida por considerações elementares.

A vida é um milagre em ação

Há milagres inexplicáveis, mas há ação no mundo. Mas às vezes é preciso uma pessoa especial para notar isso. No caso de Friedmann, ele notou e o milagre não passou despercebido.

Nascer em um dos planetas, em um dos mundos, em um instante (comparando com tempo do universo), no auge do desenvolvimento em um determinado lugar e em um determinado momento. Olhar ao redor e entender - como viver e o que fazer? No mínimo, proteger-se e ter direito a um período de vida livre. E depois fazer o que gosta e o que é interessante.

Friedmann apareceu na era das guerras e revoluções. Ele defendeu seu país na Primeira Guerra Mundial (foi apreciado e premiado por sua coragem) e ganhou uma chance em uma linha mundial de atividade pela qual poderia seguir em frente - ele se concentrou e decidiu. A principal escolha para ele foi a matemática como linguagem em que se pode falar sobre o ambiente em que todos se encontravam e que viam. Mas ele gostaria de saber como tudo funciona. O principal fator é a gravidade e o espaço-tempo - o que é o mesmo. Isso foi o início do tempo da iluminação.

A matemática lida com os graus de liberdade de movimento, uma nova visão que pode ser usada para ver onde estamos. Como tudo funciona? Deve haver dados e teoria. Com a ajuda da matemática você pode lidar com os dados, construir um modelo, resolver as equações da teoria e depois testar o modelo com novos dados. A matemática contém todos os traços de como um mundo observacional complexo se construiu como resultado de uma violação de uma simetria mais básica. Havia uma teoria – esta foi a teoria da relatividade geral (explicada nas palestras ministradas por Rozhdestvensky, o aluno de pós-graduação de Einstein, quando retornou a São Petersburgo). Mas a situação com dados era ruim, eles não existiam ainda. Entretanto, havia uma compreensão da grandeza de escala e da matéria ao redor.

Quando não há dados, a simetria ajuda. Este é sempre o caso em matemática - a simetria remove muitos parâmetros desconhecidos e deixa apenas aqueles que não a contradizem. Restam poucos deles, e muitas vezes é suficiente formular o problema com condições iniciais e de contorno - então resta apenas resolver as equações da teoria e completar o modelo do fluxo de matéria gravitacional considerando uma determinada simetria.

A simetria escolhida por Friedmann é muito forte. Seis parâmetros do grupo de movimento em um espaço tridimensional homogêneo e isotrópico. Este foi o próximo passo após o grupo de simetria de Poincaré com 10 parâmetros = 6 + 4 (tempo homogêneo e isotrópico, a três direções do espaço e as rotações de Lorentz). Melhor não tocar no tempo - todo mundo tem seu próprio tempo, que não é homogêneo e é anisotrópico. Então restam apenas seis parâmetros do que podemos chamar de grupo Friedmann. De onde vinham estes? Ninguém sabia disso. Talvez foi “Deus deu uma dica”? Mas, na prática, os modelos sempre são construídos a partir das configurações mais simples. Depois estes modelos devem ser verificados e, se os modelos simples não se encaixam, modelos mais complexos devem ser construídos para satisfazer todas

as observações e experimentos disponíveis dentro dos limites de suas aplicações.

Sim, o passo de Friedmann em direção à simetria acabou sendo correto - sobrou apenas um parâmetro livre do modelo (a curvatura do espaço), então as equações da relatividade geral foram bastante simplificadas e a sua solução foi simples – o que nós hoje chamamos de modelos de Friedmann. Restava verificá-los - o fluxo de matéria do Hubble é dado pelos modelos de Friedmann. O resultado positivo da verificação e a confirmação observacional foram conhecidos por Friedmann ainda durante sua vida (triunfo). Hoje, os modelos de Friedmann formam a base do modelo cosmológico padrão do universo.

V. N. Lukash

Instituto de Física da Academia de Ciências Russa