

CADERNOS DE ASTRONOMIA

NÚCLEO DE ASTROFÍSICA E COSMOLOGIA DA UFES

SISTEMA SOLAR

SOFTWARE PARA ESTUDO DE MANCHAS SOLARES

Artigo apresenta um código python para medições precisas de coordenadas de manchas solares

ASTRONOMIA ISLÂMICA

As conquistas astronômicas do mundo islâmico durante sua era dourada

DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA NO INSTAGRAM

Um estudo explora o potencial da rede social para a divulgação da astronomia



CADERNOS DE ASTRONOMIA

ISSN 2675-4754

www.periodicos.ufes.br/astronomia

CORPO EDITORIAL

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

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

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

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

CONSELHO CIENTÍFICO

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

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

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

DESIGN E LAYOUT

Julia Rocha de Oliveira
julia.oliveira.73@edu.ufes.br

Bruna da Silva Amorim Bragato
bruna.bragato@edu.ufes.br

ENDEREÇO

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

E-mail: cadernos@cosmo-ufes.org



SOBRE A REVISTA

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

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

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

SUBMISSÕES

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

Para mais informações acesse:
<https://periodicos.ufes.br/astronomia/about/submissions>

ARTE DE FUNDO DA CAPA E CONTRACAPA

Créditos: Kwamikagami, licença CC-BY 4.0, via Wikimedia

Commons:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013symbols.svg#filelinks>

Carta ao Leitor

O Sistema Solar é nossa vizinhança imediata na ampla estrutura cósmica da qual nós fazemos parte. Sua estrela central, o Sol, é classificada como uma anã amarela, com massa, temperatura e composição química bem determinadas, muito embora alguns dos seus importantes aspectos característicos ainda sejam objeto de estudo intenso, com muitos problemas em aberto, como os seus ciclos de atividade magnética. Um dos exemplos destes ciclos é o das manchas solares, com periodicidade de 11 anos, cuja origem e mecanismos não foram ainda completamente elucidados. O Sistema Solar também contém uma variedade de corpos celestes que se revelam ligados gravitacionalmente ao Sol. A classe mais notável destes objetos é formada por 8 planetas, sendo os quatro primeiros menores e de natureza rochosa, enquanto os quatro seguintes são denominados gigantes gasosos, devido sua estrutura fluida. Além disso, a maior parte desses planetas possuem seus próprios satélites. Deve-se acrescentar ainda os planetas anões (incluindo o controverso Plutão, que já foi classificado como planeta, mas desde 2006 foi reclassificado pela União Astronômica Internacional), asteroides, cometas, além de outras estruturas maiores como cinturão de Kuiper e a nuvem de Oort.

A vida na Terra deve-se às condições específicas presentes não apenas em nosso planeta como também no Sistema Solar como um todo. O fato de recebermos essencialmente toda a energia da qual usufruímos do Sol, e em quantidade adequada para o desenvolvimento da vida, é um dos fatores decisivos para que estruturas biológicas complexas possam ter se desenvolvido na Terra. Há também outros fatores igualmente importantes para o desenvolvimento da vida na Terra como a longa estabilidade do Sol e do próprio Sistema Solar. Desta forma, o conhecimento aprofundado dos aspectos estruturais e evolutivos do Sistema Solar deve esclarecer e nos guiar sobre o que devemos esperar na pesquisa sobre vida em outros sistemas planetários no universo.

Por outro lado, o processo de formação das estrelas é também um tema que continua a ser intensamente pesquisado, com muitos aspectos ainda obscuros, mesmo que o mecanismo geral (o colapso de uma nuvem original de gás e poeira) seja bem aceito. A estrutura e características do Sistema Solar nos dão pistas de como ocorre este processo de formação de estrelas. Assim, o estudo detalhado das diversas propriedades do Sistema Solar pode nos esclarecer sobre o processo de formação de outros objetos estelares dos quais nem sempre temos informações completas e muitas vezes indiretas. A própria estabilidade (ou meta-estabilidade) do Sistema Solar nos dá indicações como o Sol se formou e como em torno dele se estabeleceu este rico sistema astronômico.

A seção temática dessa nova edição dos *Cadernos de Astronomia* se concentra no atual estado da arte do nosso conhecimento sobre o Sistema Solar. Esta seção contém seis textos escritos por especialistas de instituições de pesquisa do Brasil e do exterior, e que abordam desde os aspectos estruturais, dinâmicos e evolutivos do Sistema Solar, até questões mais específicas

como o formato dos planetas e a plethora de pequenos objetos que povoam a vizinhança do Sol. Ressalta-se que, como abordado no artigo da professora e pesquisadora Teresinha Rodrigues (Observatório Nacional) o Brasil desenvolve um importante projeto, o *Impacton*, através de um observatório destinado ao estudo de pequenos objetos presentes no Sistema Solar, o *Oasis*, localizado no sertão pernambucano. Os diferentes textos que apresentamos muitas vezes se interpenetram, permitindo ao leitor ter acesso à complexidade dos estudos sobre o Sistema Solar.

As demais seções dessa edição dos *CdA* abordam questões como a Astronomia Islâmica, projetos de divulgação científica em comunidades e escolas do Espírito Santo, e uma metodologia para medições precisas de coordenadas de manchas solares com equipamentos de fácil acesso. É apresentado também a primeira tradução (adicionada de comentários) a partir do original em francês do artigo de Georges Lemaître de 1927 que pela primeira vez determinou a relação entre a velocidade recessional das galáxias e suas distâncias até nós, o que é hoje conhecido como lei de Hubble-Lemaître. Por fim, há uma discussão sobre o projeto DESI e seu mais recente (e possivelmente polêmico) resultado observacional em cosmologia, que indica uma estrutura dinâmica para a energia escura, contrariando a famosa constante cosmológica.

Os *Cadernos de Astronomia* procuram, nesta nova edição, apresentar aspectos fundamentais do nosso conhecimento atual em astronomia e cosmologia, ao mesmo tempo que discute as principais atualidades da pesquisa científica nessas áreas do conhecimento.

Os Editores

Sumário

Seção Temática - Sistema Solar

Nossa vizinhança cósmica: o Sistema Solar

Daniela Lazzaro 6

A Formação do Nosso Sistema Solar e a Diversidade Planetária da Nossa Galáxia

Stela Ishitani Silva 17

Sob a influência do Sol: como o Clima Espacial afeta nosso Planeta

Adriana Valio 30

OASI: um observatório dedicado aos pequenos corpos do Sistema Solar

Teresinha Rodrigues 46

Ocultações estelares: os 10 anos da descoberta dos anéis de Chariklo, e os avanços no estudo do Sistema Solar

Felipe Braga Ribas 56

Achatamento rotacional dos planetas

J. A. de Freitas Pacheco 65

Divulgação Científica, Ciência e Sociedade

Astronomia no mundo islâmico: uma perspectiva europeia

Richard Kerner 73

Artigos

Alinhamento automático de imagens do disco solar e determinação precisa de coordenadas heliográficas de manchas solares com PySDIA

Cicero Dário Grangeiro et al. 85

Ensino

Ciência, Física e Astronomia nas Escolas e para as Comunidades

Cynthia Cristina Pereira et al. 105

Instagram como Ferramenta para Divulgação Científica em Astronomia: Um Estudo de Caso na Região do Cariri Cearense

Claudio do Nascimento Souza et al. 111

Textos Clássicos

A lei de expansão do universo: tradução do artigo seminal de Georges Lemaitre

Júlio C. Fabris e Oliver Piattella 126

Notas

DESI 2024: um possível indício do fim da constante cosmológica?

Hermano Velten e Rodrigo von Marttens 136

Nossa vizinhança cósmica: o Sistema Solar

Daniela Lazzaro

Observatório Nacional

Resumo

O Sistema Solar e seus inúmeros e distintos corpos constituem a vizinhança de nosso lar, a Terra. Neste texto além de fazer uma descrição geral dos objetos que conhecemos até o momento também procuramos ressaltar as semelhanças e diferenças entre eles e o que isso nos diz com respeito a sua formação e/ou evolução. Ressaltamos que embora os corpos do Sistema Solar sejam os que melhor conhecemos de todo o imenso universo que nos cerca ainda assim existem muitas perguntas sem uma resposta satisfatória e que surgem como desafios para o futuro.

Abstract

The Solar System and its countless and distinct bodies compose the neighborhood of our home, the Earth. In this text beside performing a general inventory of the objects presently known we also highlight the similarities and differences among them and what this tells us regarding their formation and/or evolution. Although the Solar System bodies are the best that we know of all the immense universe around us, even though many questions are still lacking a satisfactory answer and appear as challenges for the future.

Palavras-chave: Sistema Solar; planetas e pequenos corpos; formação e evolução.

Keywords: Solar System; planets and minor bodies; formation and evolution.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45465](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45465)

1 Introdução

A Terra não é um corpo isolado, vagando no infinito do cosmos, mas faz parte de um conjunto que denominamos de Sistema Solar. Este pode ser definido como sendo composto por aqueles corpos que estão sob a influência gravitacional do Sol. Isso faz com que o Sistema Solar se estenda até cerca de dois anos-luz do Sol, ou seja, da ordem de 10 trilhões de quilômetros, ou 100 mil UA.¹ Entretanto, nosso conhecimento não chega até tão longe, já que até o momento somente conseguimos observar diretamente corpos até cerca de 50-100 UA apesar de saber que muitos cometas provêm de muito mais longe. Isso indica que nosso conhecimento é limitado à região mais próxima do Sol, onde uma miríade de corpos, grandes e pequenos, constituem nossa vizinhança cósmica.

O avanço do conhecimento sobre os diversos corpos do Sistema Solar pode ser descrito por

¹Unidade Astronômica, UA, é definida como a distância média entre a Terra e o Sol, sendo que 1 UA equivale a 148 milhões de quilômetros.

três fases distintas. A primeira se iniciou com o próprio homem e seu fascínio pelo céu estrelado. Além da mudança das estações, relacionadas diretamente com o Sol, a observação do movimento lento e imutável das estrelas levou à identificação de corpos em movimento entre estas: os “planetas”. Os planetas, termo que em grego significa “errante”, se pareciam com estrelas, mas com movimento diferente.

A segunda fase veio com a revolução científica, nos séculos 16 e 17. A partir de observações sistemáticas, pesquisadores como Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galileo Galilei e Isaac Newton descreveram as trajetórias dos diversos corpos do Sistema Solar e as forças que governam seus movimentos. Foi nesta época também que as observações começaram a ser feitas utilizando um novo invento: o telescópio!

A terceira, e atual, época é a da exploração espacial. Seu início pode ser associado à primeira imagem da “face oculta da Lua”, obtida em outubro de 1959 pela sonda russa Luna 3. Desde então nossa vizinhança tem sido explorada por sondas

que já visitaram todos os planetas, além de inúmeros pequenos corpos, realizando experimentos tão diversos quanto esgarçar uma superfície, recolher e trazer para a Terra amostras, provocar a formação de uma cratera e até mudar a trajetória do corpo.

A exploração espacial confirmou quanto distintos entre si são os corpos do Sistema Solar, tanto no que se refere à suas atmosferas, superfícies e estruturas geológicas quanto às evoluções fisico-dinâmicas pelas quais passaram. Essa grande diversidade complica a obtenção de modelos que consigam descrever a formação de todos os corpos e explicar o surgimento da vida na Terra.

No que segue vamos iniciar descrevendo os diversos corpos que compõem o Sistema Solar, em seguida vamos descrever o modelo atualmente mais aceito para sua formação e vamos finalizar detalhando as principais similaridades e diferenças existentes entre os corpos, tanto os grandes quanto os pequenos (para maiores detalhes, ver [1–3]).

2 Um inventário do Sistema Solar

Antes de passar a descrever os corpos que compõem o Sistema Solar é importante deixar claro que esse inventário estará incompleto. Isso porque o Sistema Solar não é nem estático e nem fechado, com colisões gerando novos fragmentos, objetos interestelares podendo atravessar nosso sistema planetário e novos objetos, geralmente menores e/ou mais distantes, sendo descobertos todos os dias. Portanto, é de se esperar que tanto as melhorias tecnológicas quanto as missões espaciais, levarão à descoberta de objetos diferentes nos obrigando a mudar a forma como os classificamos. Isso já ocorreu no passado e não tenhamos dúvidas de que irá ocorrer no futuro! Como exemplo podemos lembrar a classificação de Plutão não mais como planeta a partir da descoberta de outros corpos em suas proximidades, sendo que muitos de tamanho comparável. Nada de dramático, apenas uma mudança de “caixa” para este corpo. E como as “caixas” somos nós que as criamos a partir do que conhecemos, então nada mais normal do que criar caixas ou mudar alguns objetos de caixa. Vamos então descrever as “caixas” que contém os corpos do Sistema Solar atualmente

conhecidos (Figura 1).

A primeira contém apenas um corpo: o Sol. Este é uma estrela relativamente normal podendo ser descrita como uma enorme bola de gás incandescente com 1,4 milhões de quilômetros de diâmetro. Sua temperatura superficial é de cerca de 6000 graus enquanto sua temperatura central supera alguns milhões de graus. A principal característica do Sol é a de concentrar 99,8% de toda a massa do Sistema Solar. Isso faz com que a trajetória de todos os corpos seja regida pela atração gravitacional do Sol, como descrito por Kepler e Newton, apenas sendo perturbada, em maior ou menor grau, pelos demais. Além do mais, todos os corpos são aquecidos basicamente pela radiação do Sol a qual diminui com a raiz quadrada da distância, ou seja, quanto mais distante mais frio.

A segunda caixa é a dos planetas com oito corpos: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. A maioria dos planetas é conhecida desde a antiguidade sendo que apenas Urano e Netuno foram descobertos com o uso de telescópios (em 1781 e em 1846). De acordo com a União Astronômica Internacional um planeta é um corpo celeste que (a) está em órbita em torno do Sol, (b) tem massa suficiente para atingir uma forma de equilíbrio hidrostático (ou seja, aproximadamente redonda), e (c) tem esvaziado a região vizinha à sua órbita. Em outras palavras, os planetas são aqueles corpos que dominaram gravitacionalmente as regiões ao seu redor fazendo com que todo outro corpo em sua vizinhança fosse ou capturado ou expelido para longe.

Todos os planetas têm órbitas quase-circulares e aproximadamente coplanares, em distâncias do Sol que vão de 0,4 até 30 UA. Outra característica é a de que todos os planetas giram em torno do Sol numa única direção a qual é a mesma da rotação de cada planeta em torno de seu eixo (com exceção de Vênus que tem uma rotação dita retrógrada atribuída possivelmente a uma colisão). Em termos de composição os elementos mais abundantes são o Hidrogênio e o Hélio, com um pouco de Oxigênio e de Carbono além de traços de Neônio, Nitrogênio, Magnésio, Silício, Ferro e alguns outros. Como veremos mais adiante, todas essas características são indicativas do processo de formação a partir do colapso

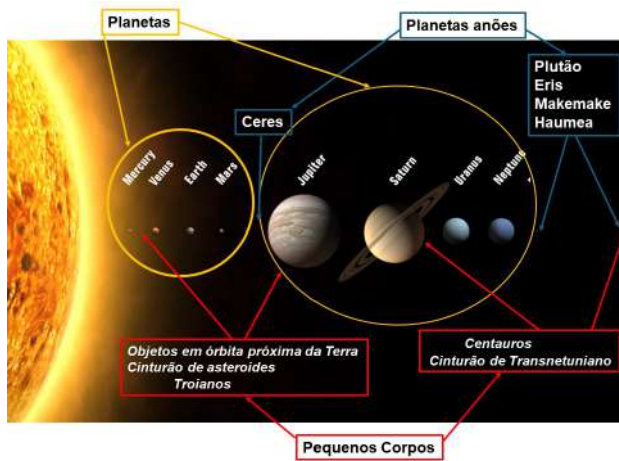


Figura 1: As diferentes classes, ou “caixas”, do Sistema Solar.

de uma nuvem de gás e poeira em rotação.

Os quatro planetas mais próximos do Sol, de Mercúrio até Marte, são denominados de planetas internos ou terrestres ou, ainda, telúricos. São mundos relativamente pequenos, aquecidos por sua proximidade com o Sol e compostos basicamente por rochas e metais. Todos têm superfícies sólidas que guardam registros dos processos geológicos atuantes no planeta que levaram à formação de crateras, montanhas e vulcões. Os quatro planetas logo a seguir, de Júpiter até Netuno, são bem maiores embora sendo compostos de materiais mais leves como o Hidrogênio e o Hélio, na forma de gás, gelo e líquido. Estes são chamados de planetas externos, ou gigantes, ou, ainda, jovianos.

Outra caixa, criada apenas em 2006, é a dos planetas anões. Assim como os planetas, são corpos em órbita em torno do Sol e que atingiram um tamanho tal a ter uma forma aproximadamente redonda, mas que falharam em esvaziar a região ao seu redor. Nesta categoria está o primeiro, e maior, corpo descoberto na região entre Marte e Júpiter, (1) Ceres. Também estão nesta caixa (134340) Plutão, o mais famoso, além de (136108) Haumea, (136199) Eris e (136472) Makemake, todos localizados no chamado Cinturão Transnetuniano, além de 30 UA. Vale aqui mencionar que foi exatamente a descoberta de que Eris tinha um tamanho aproximadamente igual ao de Plutão que levou à discussão sobre qual seria a definição de um planeta do Sistema Solar. Curiosamente, “Eris” na mitologia grega era a deusa da

discórdia, nome muito apropriado para um corpo cuja descoberta acabou resultando na criação de uma nova caixa de corpos e na mudança de classificação de Plutão.

A quarta caixa, é a dos pequenos corpos que abrange todos aqueles objetos que estão em órbita em torno do Sol, mas que não se encaixam em nenhuma das classes acima. Representam uma fração muito ínfima de toda a massa do Sistema Solar, mas seu número é quase infinito com tamanhos indo desde centenas de quilômetros até grãos de poeira. Os pequenos corpos podem ser divididos em muitas populações distintas, seja quanto à sua localização atual, sua aparência ou sua origem. Considerando a sua localização, podem ser divididos entre: objetos em órbita próxima da Terra, ou NEO do inglês Near Earth Objects, asteroides, entre as órbitas de Marte e Júpiter, Troianos, na mesma órbita de Júpiter, Centauros, em órbitas cruzadoras dos planetas gigantes, objetos Transnetunianos (TNO), em órbitas além de Netuno, e cometas, estes vindo dos confins do Sistema Solar, de um reservatório chamado de Nuvem de Oort e se distribuindo até as regiões mais internas.

Se considerarmos sua aparência, podemos dividir os pequenos corpos entre os inativos e os ativos. Os primeiros têm uma aparência pontual, tipo uma estrela, enquanto os segundos uma aparência difusa, resultante de presença de uma atmosfera difusa, chamada de coma, e, às vezes, uma cauda. Até alguns anos atrás chamávamos de asteroides os primeiros e de cometas os segundos, mas a descoberta de atividade tipo cometária em alguns asteroides assim como a de cometas que deixaram de apresentar atividade mostrou que o cenário é bem mais complexo do que isso.

Por fim, outra forma de separar os pequenos corpos é quanto ao local de sua formação: objetos formados na parte mais interna do Sistema Solar, até a órbita de Júpiter, contém materiais refratários enquanto os da parte externa contém material volátil e gelos. Essa diferença em composição é também responsável pela atividade ou não de um corpo, embora essa não seja a única condição. É necessário que o corpo que tem gelos também esteja numa órbita que o leve a distâncias onde a temperatura permite a volatilização destes. Se um objeto permanecer em regiões onde

o gelo não é volatilizado, então nunca assumirá a aparência de um cometa. É importante também lembrar que a evolução dinâmica devido às perturbações gravitacionais dos planetas, pode acabar misturando corpos formados em regiões distintas se tornando praticamente impossível identificar seu local de formação. Outro ponto é que depois de muitas passagens nas proximidades do Sol, um cometa pode acabar extinguindo todos seus voláteis não apresentando mais atividade. É o que chamamos de cometa “morto”. Outra possibilidade é a formação de uma grossa crosta que impeça o calor de volatilizar os gelos no interior. A este chamamos de um cometa “dormente”. Ambos não apresentam atividade, apesar de terem sido formados nas regiões externas do Sistema Solar!

O Sistema Solar também é composto por inúmeros satélites. Sua principal característica é de que, diferentemente dos objetos descritos acima, não estão órbita em torno do Sol, mas sim de um planeta. Cada um dos planetas, com exceção de Mercúrio e de Vênus, possui um ou mais satélites. Atualmente existem mais de 300 satélites catalogados em torno de planetas e provavelmente muitos outros menores ainda restam a serem descobertos. Estes têm tamanhos variando entre pequenos planetas e alguns metros. Entre os maiores podemos citar: a Lua, os quatro satélites maiores de Júpiter (chamados de Galileanos), Titan, satélite de Saturno, e Tritão, satélite de Urano. Todos os planetas anões, com exceção de (1) Ceres, e muitos pequenos corpos também têm um ou mais satélites. Dactyl, pequeno satélite do asteroide (243) Ida foi o primeiro a ser descoberto em 1993 pela sonda Galileo da NASA e hoje o número em torno de pequenos corpos já se aproxima de 500.

Quimicamente e estruturalmente a Lua é muito similar à própria Terra, mas isto não é a regra entre os demais sistemas de satélites. A maioria dos satélites dos planetas externos têm composição similar ao núcleo do planeta que orbitam e não ao próprio planeta. Os três maiores satélites, Ganimedes, Callisto e Titan, são compostos metade de gelo de água e metade de rochas e de metais. Estes corpos diferenciaram facilmente nos primórdios da formação planetária já que tiveram que atingir apenas a temperatura de derretimento do gelo. Hoje em dia estes satélites têm densas su-

perfícies de gelo muito duro e um interior composto de rochas e de metais. Origens diversas são invocadas para explicar os diferentes sistemas de satélites. Acredita-se que os satélites em órbitas quase circulares e no plano do equador do planeta tenham sido formados a partir de um disco de material circumplanetário, sendo os satélites Galileanos o melhor exemplo. Por outro lado, satélites em órbitas altamente inclinadas ou excêntricas devem ter sido capturados após a formação do planeta por sua gravidade, como exemplo podemos citar os dois satélites de Marte, Phobos e Deimos.

Por fim temos os anéis. Inicialmente identificados apenas em torno de Saturno, hoje sabemos que todos os planetas gigantes e até Centauros e TNO têm anéis. Os anéis são compostos por um imenso número de pequenos corpos de tamanhos variando entre um grão de areia e uma montanha, cada um seguindo órbitas independentes uma da outra ao redor do planeta.

Os anéis em torno dos diversos planetas são muito distintos, tanto em composição quanto em tamanho das partículas. O sistema de anéis de Saturno é o mais brilhante, também tendo sido o primeiro ser descoberto pelo matemático e astrônomo neerlandês Christiaan Huygens, em 1655. Talvez seja aqui importante mencionar que antes de Huygens, Galileo Galilei já tinha percebido que Saturno não tinha uma forma esférica embora não tenha chegado a propor a existência de um anel mas de dois satélites, estranhamente fixos. Os anéis de Saturno são largos e opticamente espessos, compostos por partículas de gelo de água com tamanho entre centímetros e metros. Apenas os mais externos são tênues e compostos por grãos de gelo de tamanho micrométrico. Os anéis de Júpiter são extensos, mas muito tênues e compostos basicamente de grãos de silicato de tamanho micrométrico. Por esse motivo, somente foram descobertos em 1979 quando da passagem da sonda Voyager 1, da NASA. Em torno de Urano existem anéis estreitos com partículas similares às dos principais anéis de Saturno enquanto em Netuno o principal anel é estreito e com grandes variações longitudinais, e os demais são tênues e alargados. Tanto os anéis de Urano quanto de Netuno foram descobertos apenas em 1977 e em 1984 pela técnica de ocultação estelar a qual consiste em monitorar o brilho de uma estrela enquanto um

corpo do Sistema Solar “passa na sua frente”. Foi com essa técnica também que em 2014 foi descoberto o primeiro sistema de anéis em torno de um pequeno corpo, o Centauro (10199) Chariklo. Mais recentemente, pela mesma técnica, tem sido detectada a presença de anéis em torno de alguns outros Centauros e TNO.

3 A formação e evolução do Sistema Solar

A formação do Sistema Solar é, sem dúvida, uma das questões que sempre fascinou o homem. A procura por um modelo compatível com as observações tem sido responsável pela elaboração de mais do que 50 teorias nos últimos 300 anos. Estas podem ser divididas em três tipos básicos: turbulentas, catastróficas ou nebulares.

A primeira teoria científica sobre a formação do Sistema Solar foi elaborada por René Descartes em 1644. Ele postulou um sistema de vórtices imersos em um meio cheio de um misterioso “éter” os quais dariam então origem ao Sol e aos planetas. Uma variante mais recente deste modelo propõe a existência de uma atmosfera turbulenta e em rotação em torno do Sol a qual daria origem aos planetas. O problema aqui é quanto aos processos físicos, ainda em discussão, que seriam responsáveis por dar origem as turbulências.

O segundo tipo de teoria, a catastrófica, foi inicialmente formulada por George Luis de Buffon, em 1765. Segundo esta teoria, a colisão de um cometa com o Sol teria retirado parte de matéria do Sol a qual foi posteriormente se condensando e formando os planetas. Na época acreditava-se que os cometas eram corpos com muita massa, mas hoje sabemos que estes são muito pequenos e compostos por gelos, logo, uma colisão com o Sol não teria a menor consequência. Aliás, hoje se conhece uma classe de cometas, os chamados sun-grazers, que colidem com o Sol e ninguém nem percebe! Esta teoria foi revista em 1916 por James Jeans e Harold Jeffreys, considerando que a colisão se daria com uma outra estrela. E nem precisaria ter ocorrido propriamente uma colisão, pois uma grande aproximação entre as duas estrelas já teria sido suficiente para “arrancar” uma grande quantidade de matéria do Sol. O problema com essa teoria é de que a aproximação das duas estrelas produziria inicialmente um gás

muito quente o qual se expandiria mais rapidamente do que conseguiria se condensar impossibilitando, portanto, a formação de corpos frios, os planetas.

O terceiro tipo de teoria, a nebular, foi proposta independentemente por Emmanuel Kant, em 1755, e por Pierre Simon de Laplace, em 1796, sendo hoje conhecida como a hipótese de Kant-Laplace. Por esta teoria existiria uma nuvem difusa em rotação lenta, chamada de nebulosa proto-solar. Devido à auto gravidade a nuvem teria se contraído gradualmente aumentando a velocidade de rotação até o ponto da força centrífuga ejetar anéis de matéria. Posteriormente, esses anéis teriam se condensado, formando os planetas. Esta teoria foi sendo refinada ao longo dos anos passando a ser a mais aceita e sendo hoje conhecida como o “modelo padrão” de formação do Sistema Solar.

É importante ressaltar de que qualquer teoria de formação deve ser capaz de reproduzir as características observadas do Sistema Solar sendo que as principais são: 1) todos os planetas giram em torno do Sol numa mesma direção e o Sol, por sua vez, gira em torno de seu eixo na mesma direção do movimento dos planetas; 2) todos os planetas, com exceção de Vênus, giram em torno de seu eixo nesta mesma direção;² 3) todas as órbitas dos planetas são quase-circulares e coplanares, com exceção daquela de Mercúrio que é ligeiramente excêntrica; 4) a composição química indica que, apesar de variações dependendo da distância ao Sol, todos os corpos têm uma composição muito similar e uma única idade de solidificação, ou seja, $4,55 \times 10^6$ anos; e 5) 99,8% de toda a massa do Sistema Solar está concentrada no Sol, enquanto o momento angular está nos planetas, mais precisamente, em Júpiter.

Todas as características observadas são reproduzidas pelo modelo padrão considerando que o Sistema Solar teria se formado a partir do colapso de um pequeno aglomerado de gás e poeira dentro de uma nuvem molecular gigante em rotação, talvez devido a onda de choque provocada pela explosão de uma supernova. Este aglomerado, formado por gás de hidrogênio e hélio, estaria en-

²O eixo de rotação de Urano também se distingue do padrão dos outros planetas por estar inclinado em relação à eclíptica de um ângulo de 98°, o que faz com que a rotação pareça retrógrada, não o sendo na realidade.

riquecido com uma pequena quantidade de elementos mais pesados, remanescentes da explosão de antigas gerações de estrelas. O sistema assim formado teria uma rotação única, uma composição única e uma única idade, ou seja, satisfazendo a maioria dos dados observacionais. Mais ainda: na medida que a nuvem proto-solar colapsa, a matéria vai se distribuindo num disco fino dentro do qual a massa é transferida para o centro, formando o Sol, enquanto o momento angular é transferido para a periferia, conforme observado.

Tendo um disco, resta definir como foram formados os planetas. Basicamente você tem duas formas: ou quebrando o disco em oito pedaços ou formando os oito corpos juntando pedacinhos menores do disco. Estas duas possibilidades deram origem a duas teorias principais. A primeira, propõe que instabilidades gravitacionais foram se formando num disco com massa da ordem da massa do Sol. Estas instabilidades deram então origem a proto-planetas, os quais foram capturando mais matéria até se tornarem os planetas de hoje. Este modelo, desenvolvido pelo astrofísico canadense Alastair Cameron em 1969, passou a ser conhecido como “de grande massa”, já que para iniciar instabilidades gravitacionais é necessário se ter muita massa no disco. O problema é que como a massa de todos os planetas hoje não passa de 0,01% daquela do Sol é necessário que a massa excedente tenha sido expelida por algum processo que ainda não está muito bem conhecido.

A segunda, também formulada em 1969, mas pelo astrofísico russo Vicktor Safronov, propõe que os planetas se formaram a partir da condensação do gás com os grãos de poeira existentes no disco. Este processo foi formando corpos de tamanhos variando entre alguns microns até alguns centímetros os quais foram posteriormente se aglutinando e formando corpos maiores, entre metros e alguns quilômetros, chamados de planetesimais. A aglutinação se deu a partir de suaves colisões dos planetesimais em rotação no disco. Por este modelo é possível formar os planetas a partir de um disco com uma massa da ordem de 0,01 da massa do Sol, ou seja, bem próxima daquela atual dos planetas e não sendo necessário invocar nenhum outro processo que expulse a massa excedente. Entretanto, é importante ressaltar que este processo implica no crescimento de 45 ordens de grandeza em massa através de dife-

rentes processos físicos tão distintos como condensação, dissipação pelo gás, radiação, espalhamento gravitacional, colisões etc.

Vale aqui mencionar, que na região entre Marte e Júpiter os planetesimais não chegaram a se juntar em mais um planeta. Acredita-se que isto foi devido à rápida formação de Júpiter num corpo de grandes dimensões. Isto teria gerado perturbações gravitacionais que aumentaram as excentricidades das órbitas dos objetos na região. Os encontros passaram então a se dar em altas velocidades favorecendo a fragmentação e não mais a acreção. Na região mais externa, além de Netuno, o material, em menor densidade, foi também se aglutinando em muitos corpos maiores formando o que hoje conhecemos como Cinturão Transnetuniano.

Obviamente, muitos pontos do modelo padrão ainda precisam de estudos mais detalhados, mas este consegue descrever os processos básicos da formação do Sistema Solar e reproduzir as principais características observadas. Entretanto, um modelo científico não deve apenas estar de acordo com os dados, mas deve também propor alguma nova observação que comprove que o modelo está correto. Quanto ao modelo padrão este traz embutida uma hipótese fundamental: o processo pelo qual o Sistema Solar se formou é um processo comum de formação estelar. Logo, ele propõe que deveríamos encontrar não apenas muitos outros sistemas planetários, mas também muitos objetos nos estágios intermediários da formação. E isto vem sendo comprovado nas últimas décadas! Na Nebulosa Orion tem sido observada a formação de estrelas a partir do colapso de pequenas nuvens. A descoberta do disco de poeira de β -Pictoris assim como de muitos outros discos protoplanetários têm comprovado a existência desta fase na formação planetária. Por fim, em 1995 foi descoberto o primeiro planeta em torno de outra estrela e hoje já se conhecem mais de mil de planetas extrassolares, ou exoplanetas. Logo, o “modelo padrão” não apenas está de acordo com o que é observado no Sistema Solar, mas também é bem-sucedido em suas previsões. Talvez seja bom aqui mencionar que a maioria dos exoplanetas descobertos até o momento difere muito daqueles do nosso Sistema Solar, devendo ter tido uma formação diferente. Entretanto, acredita-se que isto se deva principalmente as limitações tec-

nológicas atuais, as quais ainda não nos permitiram observar sistemas planetários similares ao Solar.

Para finalizar é importante lembrar que o Sistema Solar não é estático, ou seja, está em contínua evolução já que os corpos interagem tanto devido à interação gravitacional quanto a colisões. Também podemos pensar que os planetas podem não ter se formado nas posições em que se encontram hoje em dia, mas foram evoluindo até estas. Vale lembrar que os planetas se formaram dentro de um disco composto por uma miríade de planetesimais. Estes pequenos corpos devem ter interagido gravitacionalmente com os planetas os levando a se deslocarem lentamente ao longo do tempo. É o que chamamos de migração planetária devido à troca de momento angular entre planetesimais e planetas em formação. Nos últimos 20 anos a teoria de Nice, como ficou conhecida por ter sido elaborada por pesquisadores no Observatório de Nice (França), e suas inúmeras variantes, tem tentado reproduzir a configuração atual dos planetas e pequenos corpos a partir de configurações iniciais diferentes das atuais. Modelos com nomes sugestivos como “Júpiter Saltitante” ou a “A Grande Tacada” tem procurado reproduzir o atual Sistema Solar utilizando ou mais planetas nos estágios finais da formação, ou uma distribuição inicial mais próxima ao Sol, ou a presença do gás enquanto o sistema ainda não estava em sua forma final. Provavelmente, muitas outras teorias ainda surgirão já que o que temos são apenas informações sobre o estágio atual e não o inicial, mas os princípios básicos do modelo padrão não deverão mudar.

4 Os planetas: diferenças e similaridades

Conforme descrito acima, os planetas do Sistema Solar estão classificados numa mesma “caixa” sendo apenas divididos entre os terrestres e os gigantes. Mas, tanto uns quanto os outros, apresentam algumas similaridades e muitas diferenças quando comparados entre si.

Vamos começar pelas similaridades entre os planetas terrestres (Figura 2). Todos têm uma composição de rochas e metais, sendo que a Terra, Vênus e Marte têm aproximadamente a mesma composição com cerca de 2/3 de silicatos e 1/3



Figura 2: Os quatro planetas terrestres aproximadamente em escala: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte.

de metais (combinações de ferro e de níquel ou de enxofre) e apenas Mercúrio tem, proporcionalmente, mais metais. Os materiais mais densos, os metais, estão situados em suas partes centrais. Esta estrutura interna, chamada de diferenciada, nos indica que em algum momento esses corpos foram aquecidos até o ponto fusão permitindo aos materiais mais pesados irem para o fundo. Devido à pouca quantidade de hidrogênio presente, estes planetas exibem uma grande variedade de compostos de oxigênio.

Quanto às diferenças, estas são muitas! Mercúrio, o menor e mais interno, tem uma atmosfera muito tênue, uma superfície saturada de crateras e uma rotação muito lenta (1 dia “mercuriano” tem a duração de cerca 176 dias terrestres) o que acaba levando a uma grande variação da temperatura superficial entre quase 200 graus negativos e 400 graus positivos. Por outro lado, Vênus, tem uma atmosfera muito densa, composta essencialmente de dióxido de carbono e enxofre, que gera um efeito estufa extremo não deixando o calor escapar e elevando a temperatura superficial até mais do que 400 graus. Apresenta uma superfície sem crateras e com indícios de atividade vulcânica passada e, talvez, até presente. A nossa casa, a Terra tem uma atmosfera com densidade ideal e efeito estufa moderado o que permite tanto a presença de água líquida na superfície quanto uma proteção contra impactos de corpos vindos do espaço. O movimento das placas tectônicas, único em todo o Sistema Solar, é responsável pelo chamado ciclo do carbono que mantém o equilíbrio da temperatura. Por fim, Marte tem uma tênue atmosfera fazendo com que a temperatura

superficial tenha grandes variações entre o dia e a noite. Atualmente é impossível existir água líquida em sua superfície, mas esta deve ter estado abundante no passado conforme indicam várias estruturas formadas por grandes fluxos de material líquido.

As superfícies de todos os planetas terrestres têm sido modificadas ao longo dos tempos por forças internas e externas. Cada planeta tem sido bombardeado por projeteis vindo do espaço os quais, em geral, deixam as superfícies recobertas de crateras. Embora tenhamos indicações de que este bombardeamento tenha sido muito mais intenso nos primórdios do Sistema Solar, perdura até hoje. Provas recentes disto foram a colisão do cometa Shoemaker-Levy 9 com Júpiter, em meados de 1994, e o bólido que caiu em Chelyabinsk (Rússia) em 2013.

Forças internas, por outro lado, têm modelado as superfícies planetárias através da formação de montanhas, da erupção de vulcões e da violência dos terremotos e maremotos. Estas estruturas são devidas ao que chamamos de atividade geológica de um planeta. A Terra e Vênus são os planetas que têm, ou tiveram, o maior nível de atividade geológica. Apenas um corpo em todo o Sistema Solar é mais ativo: o satélite Io, de Júpiter, mas isto graças a movimentos de maré devido à proximidade com Júpiter. Por outro lado, Marte e Mercúrio, são mundos completamente mortos.

Estes diferentes graus de atividade geológica se devem a um interior quente. Os vulcões, assim como as montanhas, são resultantes do calor escapando do interior de um planeta. Este calor interno foi obtido durante o processo de formação dos planetas e, por este motivo, é chamado de primordial. Entretanto, quanto menor for um planeta, mais facilmente vai perder o calor interno e se tornar inativo. Isto foi o que, muito provavelmente, aconteceu com Mercúrio e Marte. Este último apesar de apresentar indícios de ter tido uma considerável atividade interna, esta cessou completamente.

Por terem sido formados numa região relativamente próxima, entre 0,4 e 1,5 UA do Sol, não se acredita que as diferenças observadas nos planetas terrestres sejam devidas à sua formação, mas sim a evoluções distintas. Por exemplo, as observações indicam que todas as atmosferas não

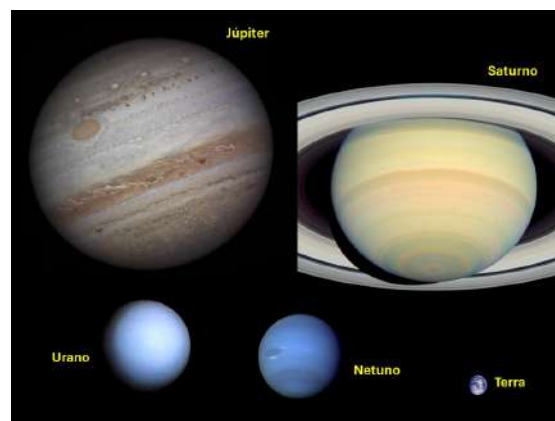


Figura 3: Os quatro planetas gigantes aproximadamente em escala: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. No canto direito, também aproximadamente em escala, a Terra.

foram capturadas da nebulosa solar na formação. Estas atmosferas, ditas secundárias, foram formadas por diversos processos tais como: durante a fase de acreção quando impactos causaram grande aquecimento, ou pelo impacto de pequenos corpos ricos em voláteis, ou através de uma contínua atividade vulcânica. No caso de Vênus, entretanto, o efeito estufa extremo levou a que a atmosfera se tornasse espessa demais levando a um aquecimento secular da superfície. Por outro lado, Marte não conseguiu reter a atmosfera nem a água líquida em sua superfície devido à sua pequena massa.

Entre os planetas gigantes Júpiter e Saturno, têm aproximadamente a mesma composição do que o Sol, consistindo basicamente em hidrogênio e hélio, numa proporção de 75% o primeiro e 25% o segundo. Às vezes são chamados de planetas gasosos já que na Terra estes dois elementos assumem o estado de gás. Na verdade, isto é incorreto já que, devido ao seu grande tamanho o gás no interior destes planetas é comprimido a tal ponto que o hidrogênio passa ao estado líquido. Num planeta líquido ou gasoso, devido à força da gravidade, os elementos mais pesados tendem a cair para o fundo, ou melhor, para o centro. Isto é o que ocorre tanto em Júpiter quanto em Saturno os quais têm núcleos compostos de rochas e metais.

Urano e Netuno apesar de bem menores do que Júpiter e Saturno (Figura 3), também têm núcleos compostos de rocha e de metal. Um aspecto interessante é de que o tamanho do núcleo dos quatro planetas gigantes ser aproximada-

mente igual, ou seja, cerca de dez vezes o tamanho da Terra. Isto parece indicar que os quatro planetas começaram a ser formados iguais e apenas posteriormente capturaram hidrogênio e hélio para formar suas atmosferas. Neste caso, Urano e Netuno não foram tão eficientes quanto Júpiter e Saturno e permaneceram de menor tamanho.

Estes quatro planetas têm uma composição dominada por hidrogênio e seus compostos. Todo o oxigênio disponível se combina quimicamente com o hidrogênio para formar água (H_2O). Os demais compostos presentes nestes planetas são o metano (CH_4) e o amônio (NH_3), além de hidrocarbonetos tais como o etano (C_2H_6) e o acetileno (C_2H_2). As nuvens superiores de Júpiter e Saturno são compostas por cristais de amônio enquanto as de Urano de metano. É este último composto responsável pela coloração azulada deste planeta.

No caso dos planetas gigantes, o que os caracteriza é sua energia interna. O próprio Júpiter emite tanto calor interno quanto o que recebe do Sol. Neste caso a energia interna é ainda aquela adquirida durante a formação, ou seja, a primordial. Por outro lado, Saturno gera energia interna devido a um processo de diferenciação que consiste na segregação do hélio e do hidrogênio. Sendo o hélio mais pesado, pequenas gotículas deste elemento vão caindo na direção do núcleo e neste processo geram calor. Netuno também tem uma pequena energia interna enquanto Urano não. Isto faz com que os dois planetas tenham a mesma temperatura mesmo que Netuno esteja a uma maior distância do Sol.

Portanto, conforme podemos ver, mesmo estando numa mesma “caixa” os planetas são muito diferentes entre si. O mesmo pode ser dito dos pequenos corpos, como detalharemos a seguir.

5 A complexa miríade de pequenos corpos

Os cometas foram os primeiros corpos da vasta população de pequenos corpos a serem identificados e seus registros remontam ao período antes de Cristo. Esses corpos espetaculares, com grande brilho e longas caudas, em movimento em relação às estrelas fixas, apareciam de forma inesperada chegando a aterrorizar os homens os quais passaram a associá-los a tragédias sendo vistos como

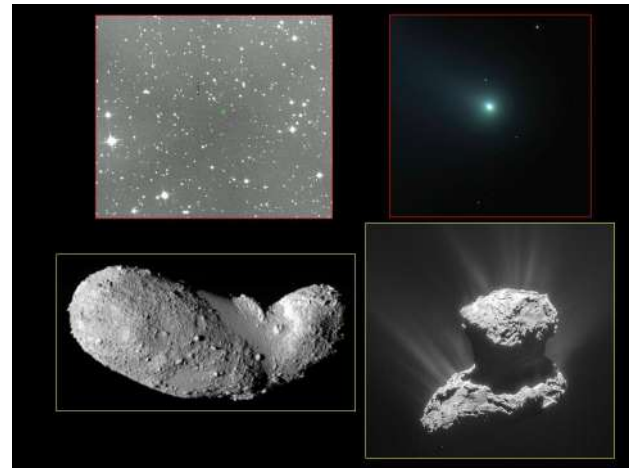


Figura 4: Imagens de pequenos corpos, inativos e ativos, obtidas de telescópio na Terra e sondas espaciais. As duas imagens da parte de cima foram obtidas utilizando o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica: na esquerda, o asteroide (10468) Itacuruba e, na direita, o cometa C/2020 F3 (NEOWISE). Na parte de baixo, na direita, imagem do asteroide (25143) Itokawa obtido pela sonda Hayabusa, da Agência Espacial Japonesa (JAXA) e, na esquerda, imagem do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, obtida pela sonda Rosetta da Agência Espacial Europeia (ESA).

sinais de mau agouro (Figura 4).

Apenas em inícios de 1801, outro pequeno corpo foi identificado entre as órbitas de Marte e Júpiter. Diferentemente dos cometas, este corpo, assim como os demais descobertos nos anos subsequentes nesta mesma região, tinha uma aparência igual a de uma estrela. Daí o nome de “asteroide” sugerido por W. Herschel em 1803 e que em latim quer dizer “quase-estrela”. Como nota histórica vale mencionar que estes pequenos corpos foram considerados planetas até cerca de 1845 quando já tinham sido descobertos cerca de 15 objetos na região. Com o passar do tempo as centenas e milhares de asteroides acabaram sendo classificados em diferentes grupos devido basicamente às suas propriedades dinâmicas. Em 1898, por exemplo, foi descoberto (433) Eros, o primeiro objeto de uma vasta população em órbitas próximas da Terra, os chamados NEO (do inglês Near-Earth Objects). Hoje definimos os NEO como aqueles objetos com periélio menor do que 1,3 UA e, em geral, afélio menor do que 5,2 UA, que define a órbita de Júpiter.

Mas novas populações de pequenos corpos não pararam de ser descobertas. Em 1977 G. Kuiper descobriu o “asteroide mais distante do Sistema

Solar”, Chiron. O tempo mostrou que este objeto, com órbita entre Saturno e Urano, não estava sozinho, e vários outros foram sendo descobertos em órbitas que cruzam aquelas dos planetas gigantes. Mas essa não era a única particularidade de Chiron, já que logo após sua descoberta foi observado um aumento de seu brilho, como no caso de cometas. Essa dualidade asteroide-cometa, levou a dar o nome de Centauro, meio-homem e meio-cavalo, a esta nova população de pequenos corpos. No caso específico de Chiron este passou a ter dupla denominação: o asteroide (2060) Chiron e o cometa periódico 95P/Chiron. A população dos Centauros é dinamicamente similar a dos NEO: as órbitas de ambas cruzam, ou se aproximam muito, daquelas dos planetas gigantes, os primeiros, ou dos terrestres, os segundos. Isto gera perturbações gravitacionais e instabilidades que fazem com que os corpos sejam ejetados de suas órbitas em intervalos de tempo menores do que a idade do próprio Sistema Solar. Como essas populações existem até hoje, isso indica que deve haver um contínuo fluxo de objetos indo tanto para a região dos NEO quanto a dos Centauros.

A descoberta dos objetos transnetunianos foi um pouco mais complicada. Em 1930 Clyde Tombaugh descobriu Plutão, sendo considerado como o nono planeta do Sistema Solar. Esta descoberta foi resultante de uma busca sistemática levada a cabo no Lowell Observatory (EUA) com o objetivo de encontrar mais um planeta que aparentemente estaria perturbando a órbita de Urano. Vale lembrar que a descoberta de Netuno, em 1846, se deu a partir de previsões matemáticas feitas por Urbain Le Verrier e John Adams, de um corpo que estaria perturbando a órbita de Urano. No caso de Plutão, entretanto, nenhuma previsão matemática conseguiu definir qual a localização do suposto planeta e sua descoberta foi fruto apenas de um mapeamento sistemático do céu. Como nota curiosa, vale mencionar que muitos anos mais tarde ficou comprovado que a órbita de Urano não sofria nenhuma perturbação além das já conhecidas sendo que os desvios observados em sua órbita se deviam apenas a erros devidos à utilização de massas incorretas para os planetas gigantes.

Mas vamos voltar aos TNO. Entre 1938 e 1949 o astrônomo irlandês Kenneth Edgeworth publicou uma série de artigos postulando a existência

de objetos além de Plutão a partir de considerações sobre a formação do Sistema Solar. Quanto ao próprio Plutão, Edgeworth o considerava pequeno demais para ser considerado um planeta e sugeria que seria um satélite que teria escapado da influência de Netuno. Em 1951 outro astrônomo, o americano Gerard Kuiper, também propõe a existência de um cinturão de corpos na região mais externa baseado no destino do material do disco além Netuno. Finalmente, em 1980 Julio Fernández, pesquisador uruguaio, estudando a origem dos cometas periódicos propõe que estes devem vir de um reservatório situado entre 35 e 50 UA no qual existiriam objetos do tamanho de Plutão. Desde 1976 inúmeras buscas sistemáticas tentaram identificar objetos nesta região o que somente acabou ocorrendo em 1992. O segundo transnetuniano descoberto foi (15760) Albion cuja denominação provisória era 1992 QB1 e que deu origem ao termo “cubewano” para os objetos que viriam a ser descobertos nesta mesma região. Hoje são conhecidos cerca de 3000 objetos na região, sendo que vários com tamanhos comparáveis ao de Plutão, conforme já previsto por J. Fernández.

Por fim, além de 10.000 UA se situa a Nuvem de Oort que é um reservatório dos cometas de longo período. O nome vem do astrônomo holandês Jan H. Oort que foi o primeiro a propor a existência de um reservatório englobando esfericamente todo o Sistema Solar. Este teria sido formado nos estágios finais da formação pelos pequenos corpos ejetados por interações gravitacionais com os planetas gigantes. Diversas perturbações gravitacionais, devidas tanto à nossa galáxia quanto à passagem de estrelas, fazem com que corpos acabem entrando no Sistema Solar interior em órbitas extremamente excêntricas e, em sua maioria, muito inclinadas. Essa diferença em relação as órbitas planetárias e dos demais pequenos corpos, todos com baixas excentricidade e inclinação, indica que seu local de origem não foi um disco.

6 Desafios

Apesar dos imensos avanços no conhecimento sobre nossa vizinhança cósmica, ainda muito resta a ser entendido e descoberto. Dois pon-

tos são, entretanto, fundamentais: entender todos os estágios de formação e evolução dos diferentes corpos do Sistema Solar e identificar os requerimentos necessários para o surgimento da vida. Entre as diversas questões a serem respondidas nas próximas décadas podemos mencionar:

1. Quais os estágios iniciais, as condições e os processos da formação do Sistema Solar e qual a natureza do material interestelar que foi incorporado?
2. Qual o papel da mistura de materiais na formação planetária? Existiu mistura em algum momento?
3. Como os planetas gigantes e seus sistemas de satélites conseguiram se formar? Será que migraram para locais diferentes de onde se formaram? E, se migraram, onde se formaram?
4. O que governou o suprimento de água, a química e a diferenciação interna dos planetas terrestres e a evolução de suas atmosferas? Será que as distintas evoluções foram devidas ao bombardeamento por grandes projéteis?
5. Quais as fontes primordiais do material orgânico e onde ainda é sintetizado hoje em dia?
6. Será que Marte ou Vênus abrigaram antigamente ambientes ricos em água que levou ao surgimento da vida? Existem evidências de que vida conseguiu emergir fora da Terra?
7. Será que existem outros lugares no Sistema Solar com as condições necessárias para manter a vida? Será que lá existem organismos vivos hoje em dia?

Como podemos ver mesmo sendo nossa vizinhança cósmica, o Sistema Solar ainda guarda muitos segredos e muito ainda resta a ser descoberto e entendido. A única certeza que podemos ter é de que os corpos do nosso sistema planetário são, de todo o imenso universo que nos rodeia, os que conhecemos em mais detalhe.

Agradecimentos

O presente texto tem como base a pesquisa que tem sido realizada por mim e minha equipe ao longo dos anos com o inestimável apoio do CNPq (atualmente processo no. 310964/2020-2) e da FAPERJ (atualmente processo no. E-26/201.001/2021), pelo qual sou muito grata. Gostaria também de agradecer aos inúmeros alunos que passaram por meus cursos na pós-graduação do Observatório Nacional, cuja curiosidade e interesse tem me levado a tentar melhor compreender as reais diferenças e similaridades dos corpos de nossa vizinhança cósmica.

Sobre a autora

Daniela Lazzaro (lazzaro@on.br) é pesquisadora do Observatório Nacional (ON). É especialista no estudo de pequenos corpos do Sistema Solar com mais de 100 artigos publicados em revistas científicas. É membro da Academia Brasileira de Ciências e da Academia Latino-Americana de Ciência. Foi a idealizadora e coordenadora da implantação do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica, instalado no sertão pernambucano e dedicado ao estudo de pequenos corpos do Sistema Solar.

Referências

- [1] J. J. Lissauer e I. de Pater, *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability* (Cambridge University Press, 2019).
- [2] L. M. Lara e D. Jewitt, *Planetary Systems Now* (World Scientific, 2022).
- [3] D. Lazzaro, *O Sistema Solar e seus corpos extraordinários*, *Ciência Hoje* **43**, 40 (2009).

A formação do nosso Sistema Solar e a diversidade planetária da nossa galáxia

Stela Ishitani Silva

NASA Goddard Space Flight Center

Resumo

O Sistema Solar é o único, entre os bilhões de sistemas planetários previstos em nossa Galáxia, que até agora sabemos hospedar vida. Morada do Sol, da Lua, da Terra e de outros sete planetas, sua formação começou há aproximadamente 4,56 bilhões de anos. Este artigo propõe uma recapitulação da formação do Sistema Solar, detalhando os principais passos desse processo, começando com uma nuvem de gás na nossa Galáxia e seguindo para o nascimento do Sol, a formação de planetas como Júpiter e a Terra, e as origens de corpos celestes menores, como luas, asteroides e cometas. As teorias atuais são fundamentadas tanto em observações do nosso próprio Sistema Solar quanto em estudos de outros sistemas planetários com diferentes idades e localizações na Galáxia. A análise do nosso Sistema Solar no contexto de outros sistemas planetários destaca como essas comparações são cruciais para aprofundar nossa compreensão sobre os processos de formação e evolução planetária.

Abstract

The Solar System is the only one, among the billions of planetary systems predicted in our Galaxy, that is currently known to host life. Home to the Sun, the Moon, Earth, and seven other planets, its formation began approximately 4.56 billion years ago. This paper provides a review of the formation of the Solar System, detailing the key steps in the process, from a cloud of gas in our Galaxy to the birth of the Sun, the formation of planets like Jupiter and Earth, and the origins of smaller celestial bodies such as moons, asteroids, and comets. Current theories are based on observations of our own Solar System as well as studies of other planetary systems with varying ages and locations in the Galaxy. Analyzing our Solar System in the context of other planetary systems highlights how these comparisons are crucial for deepening our understanding of planetary formation and evolution processes.

Palavras-chave: Sistema Solar, formação, planetas, exoplanetas

Keywords: solar system, formation, planets, exoplanets

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.46010](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.46010)

1 Introdução

Lar dos astros celestes mais próximos de nós, o nosso Sistema Solar nos oferece inúmeras informações sobre as leis da natureza. E entender sua origem e evolução é parte dos principais objetivos da astrofísica. A formação do nosso Sistema Solar começou há aproximadamente 4,56 bilhões de anos [1], recente quando comparada à nossa Galáxia, que tem idade aproximada de 13 bilhões de anos [2].

O Sistema Solar é apenas um entre os bilhões de sistemas planetários previstos na Via Láctea (veja Figura 1). Missões espaciais como *Voyager 1 e 2*, *Cassini-Huygens*, *Galileo* e *New Horizons* forneceram informações valiosas sobre o

nosso Sistema Solar. Da mesma forma, missões como *Hubble*, *Webb*, *Gaia*, *Kepler* e *TESS* nos proporcionaram uma compreensão de outros sistemas planetários. Com mais de 5 mil exoplanetas¹ já identificados e confirmados [3] e inúmeros estudos do nosso próprio Sistema Solar, entendemos cada vez mais como o Sol e os planetas se formaram, e como eles evoluirão no futuro.

Este artigo tem como objetivo detalhar nosso conhecimento atual sobre a formação do Sistema Solar, fundamentado em sua estrutura atual e nas observações de outros sistemas planetários. O artigo inicia com a introdução dos principais corpos celestes do nosso sistema na Seção 2, seguida pela

¹Planetas fora do Sistema Solar.

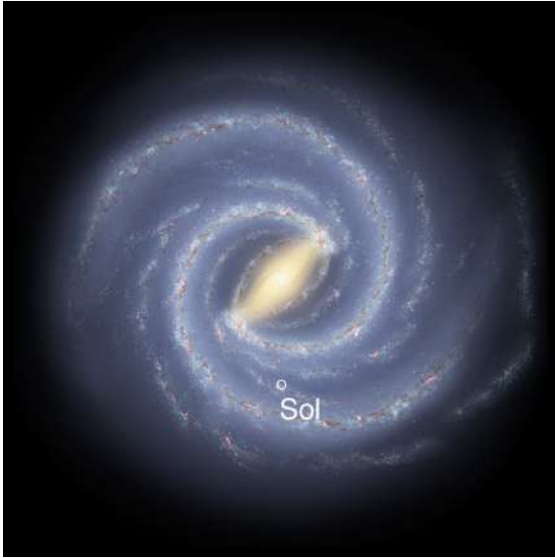


Figura 1: Ilustração artística da Via Láctea, nossa Galáxia, e da localização do nosso Sol. Imagem adaptada de NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC/Caltech).

descrição do nascimento do Sol na Seção 3. Em seguida, a Seção 4 oferece uma análise detalhada de dois percursos distintos de formação planetária, exemplificados por Júpiter e pela Terra. As Seções 5 e 6 abordam a origem de corpos menores como satélites naturais, asteroides e cometas. Posteriormente, a Seção 7 discute a comparação entre os planetas do nosso sistema e aqueles encontrados fora dele. Por fim, o artigo é concluído com uma seção de conclusão 8.

2 Nosso Sistema Solar

Dando nome ao nosso sistema planetário, o Sol contém cerca de 99,85% da massa do Sistema Solar, enquanto os oito planetas juntos representam aproximadamente 0,135% da massa total. Os restantes 0,015% estão distribuídos entre corpos menores, como os objetos transnetunianos,² cometas, asteroides e satélites dos planetas [4].

Dos clássicos oito planetas, quatro planetas pequenos e rochosos orbitam próximos ao Sol (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) e, em órbitas mais afastadas, dois gigantes gasosos (Júpiter e Saturno) e dois gigantes de gelo (Urano e Netuno). Com órbitas quase-circulares³ e quase-

²Inclui os planetas anões: Plutão, Éris, Makemake, Gonggong e Haumea.

³Com exceção de Mercúrio, as excentricidades são me-

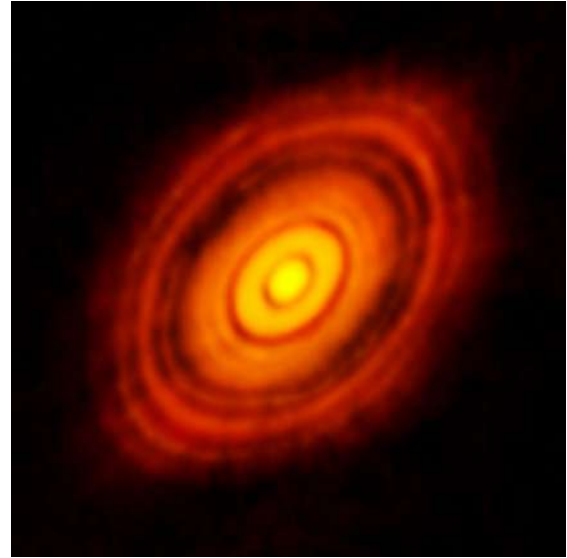


Figura 2: Disco protoplanetário ao redor da jovem estrela HL Tauri, mostrando subestruturas dentro do disco e até mesmo as possíveis posições de planetas se formando nas manchas escuras dentro do sistema. Crédito: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO).

coplanares,⁴ suas configurações sugerem que os planetas tiveram formação em um disco ao redor de um Sol jovem [5]. Veja Tabela 1 com características dos oito planetas.

3 Nasce uma estrela: o Sol

Atualmente, acredita-se que o nosso Sol não se formou de forma isolada, mas como parte de um aglomerado com cerca de $10^3 - 10^4$ estrelas em formação [7] que após alguns milhões de anos se dispersaram pela Galáxia. O ambiente em que o Sol se formou é teorizado baseado em característica do nosso Sistema Solar, como a presença de Alumínio-26 nos meteoritos e a ausência de sinais de desestabilização tanto no Cinturão de Kuiper quanto nas órbitas de Urano, Netuno [5, 7].⁵

nores que 10%.

⁴Suas inclinações orbitais são menores que alguns graus.

⁵O Alumínio-26, encontrado em meteoritos, é produzido durante supernovas de estrelas massivas. Como estrelas massivas são raras (uma para cada algumas centenas de estrelas de baixa massa), o aglomerado de nascimento do Sol deve ter contido pelo menos 10^3 estrelas. Por outro lado, a ausência de desestabilização nas órbitas indica um limite superior de 10^4 estrelas no aglomerado original, já que uma quantidade maior de estrelas implicariam em mais instabilidades orbitais [5].

Tabela 1: Características dos planetas do Sistema Solar. A Unidade Astronômica (UA) refere-se à distância entre a Terra e o Sol, que corresponde a cerca de 150 milhões de quilômetros. Um ano corresponde ao intervalo de tempo necessário para que o planeta complete uma revolução completa ao redor do Sol. Adaptado de [6].

Planeta	Semi-eixo Maior (UA)	Excentricidade	Inclinação Orbital (°)	Massa (10^{24} kg)	Raio (km)	Temperatura (°C)	Ano (dias)	Luas
Mercúrio	0,387	0,206	7,0	0,330	4.879	167	88,0	0
Vênus	0,723	0,007	3,4	4,87	12.104	464	224,7	0
Terra	1,000	0,017	0,0	5,97	12.756	15	365,2	1
Marte	1,52	0,094	1,8	0,642	6.792	-65	687,0	2
Júpiter	5,20	0,049	1,3	1.898	142.984	-110	4.331	95
Saturno	9,57	0,052	2,5	568	120.536	-140	10.747	146
Urano	19,17	0,047	0,8	86,8	51.118	-195	30.589	28
Netuno	30,18	0,010	1,8	102	49.528	-200	59.800	16

Nove bilhões de anos após o Big Bang, uma nuvem gigante de gás orbitava a Via Láctea [5]. Composta principalmente de hidrogênio e hélio [8], suas moléculas somavam a massa de milhares de sóis. Dentro dessa nuvem, milhares de nós de gás começaram a colapsar sob sua própria gravidade [5].

No centro de um desses nós, formou-se um protossol [8], uma pré-estrela. Com a maior parte da massa concentrada no protossol, o restante desse nó se achatou em um disco de gás e poeira formando o disco protoplanetário (veja Figuras 2 e 3), em que se manteve rotação devido à conservação do momento angular [8]. No protossol, a pressão gerada pelas altas densidades deram então início à fusão nuclear, marcando o nascimento do Sol.

No processo subsequente de evolução do disco protoplanetário, surgiram planetas, luas, asteroides e cometas, que caracterizam o Sistema Solar. Imagens de telescópios como a do Telescópio Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, veja Figura 2) ou *Telescópio Hubble*⁶ (veja Figura 3) que mostram discos ao redor de estrelas jovens são evidências de que planetas se formam em discos protoplanetários ao redor de uma estrela jovem.

4 Formação dos planetas

O processo de formação planetária envolve diversas etapas, incluindo a formação inicial dos

⁶Observatórios espaciais são indicados em itálico, enquanto observatórios em terra são escritos em formato regular.

planetesimais, seu crescimento em embriões através de diferentes tipos de acreção (de seixos e/ou planetesimais), migração orbital, acreção de gás para formar protoplanetas gigantes, grandes impactos e, finalmente, a acreção tardia [5]. Por questões didáticas é possível simplificar a formação dos planetas em duas principais trajetórias representadas pela formação de Júpiter e pela formação da Terra como esquematizado na Figura 4.

Tabela 2: Tamanho característico de objetos que descrevem a formação dos planetas [5].

Objeto	Tamanho típico
Seixos	1mm - 10cm
Planetesimais	10km - 100km
Embriões de planetas rochosos	~ Lua - Marte
Embriões de planetas gigantes	~ 5-20x Terra

4.1 Planetesimais

Planetesimais são corpos sólidos fundamentais na formação dos planetas que atuam como pequenos blocos de construção (veja Tabela 2 para os principais objetos presente na formação de planetas). Pequenos em escala astronômica, eles têm o diâmetro típico variando de 10 a 100 km [5]. Os asteroides e cometas que conhecemos são na maioria das vezes remanescentes ou fragmentos desses planetesimais que não se transformaram em planetas. Evidências geoquímicas e astronômicas, como medições de meteoritos, indicam que o Sistema Solar se formou a partir de dois reservatórios distintos de planetesimais [10].

A formação de planetesimais começa com a coagulação de grãos de poeira, que são fortemente acoplados ao gás no disco protoplanetário por for-



Figura 3: Diversos discos protoplanetários na Nebulosa de Órion, descobertos pelo *Telescópio Hubble*. Crédito: NASA, ESA e L. Ricci (ESO) [9].

ças de arrasto. Teorias recentes, como a instabilidade de fluxo, sugerem que as interações aerodinâmicas entre esses grãos e o gás do disco podem levar à formação de aglomerados densos. Esses aglomerados podem eventualmente colapsar sob sua própria gravidade, formando planetesimais [5, 11]. Esse passo na formação dos planetas é representado pela cor verde na Figura 4.

Acredita-se que durante a evolução do nosso disco protoplanetário, a linha de neve⁷ migrou primeiro para fora e depois para dentro, criando duas populações distintas de planetesimais [10]. A composição dos planetesimais reflete a dos grãos de que são formados: próximo ao Sol, eles são compostos de ferro e rocha, enquanto mais distante, em regiões mais frias, a água se condensa em gelo sólido, resultando em planetesimais compostos por misturas de gelo e rocha [5].

Planetesimais continuam a crescer de duas maneiras: colidindo com outros planetesimais (acrecção de planetesimais) ou por meio de colisões com seixos em deriva (acrecção de seixos) [5, 12]. À medida que crescem, eles podem evoluir para em-

briões planetários, que têm o potencial de se tornar planetas.

4.2 Embriões planetários

Embriões planetários, também chamados de protoplanetas, são corpos celestes presentes durante a formação do Sistema Solar que ainda não evoluíram para planetas completos. Eles são maiores que os planetesimais e ainda não adquiriram uma forma completamente esférica nem uma órbita estabilizada.

O caminho evolutivo do protoplaneta que deu origem à Terra foi diferente do caminho seguido pelo protoplaneta que formou Júpiter. Essas diferenças são atribuídas à massa desses corpos e ao ambiente em que se formaram (além ou dentro da linha de neve). Na Figura 4, é apresentado um esquema representando a evolução dos embriões de planetas rochosos em amarelo e dos embriões de planetas gigantes em azul.

4.2.1 Embriões de planetas rochosos

Os embriões que evoluem para planetas rochosos têm tipicamente massas entre as da Lua e

⁷Fronteira entre as regiões com vapor d'água e gelo sólido.

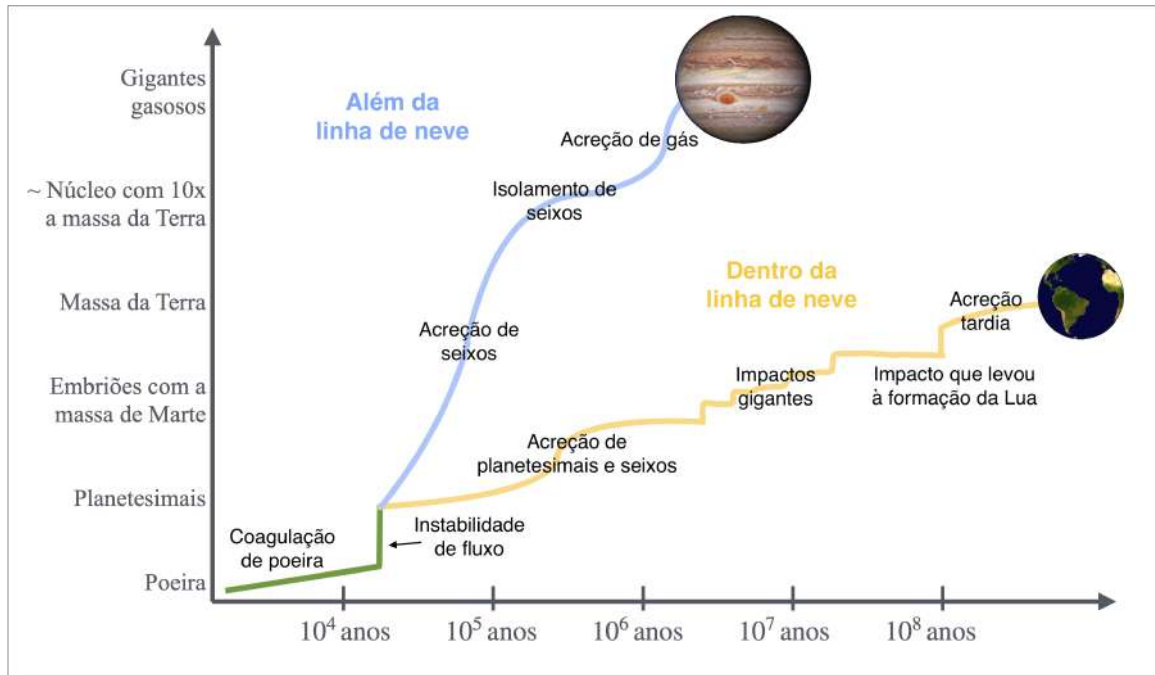


Figura 4: Esquema dos principais processos durante uma formação planetária, ilustrados pelas trajetórias de formação de Júpiter (azul) e da Terra (amarelo). Em verde, o processo inicial em comum de suas trajetórias. Gráfico adaptado de [5]. Imagem de Júpiter: NASA/ESA/NOIRLab/NSF/AURA/M.H. Wong and I. de Pater (UC Berkeley) et al. Imagem da Terra: NASA MODIS/ NASA GSFC/NOOA.

Marte e crescem eficientemente através da acreção de planetesimais em algumas centenas de milhares de anos [5]. Quando sua massa aproxima da de Ceres ou da Lua, a acreção de seixos, mesmo que lenta, se torna o principal mecanismo de crescimento [12]. A trajetória de formação dos planetas rochosos é representada de amarelo na Figura 4.

4.2.2 Embriões de planetas gigantes

A acreção de seixos foi o principal processo na formação de embriões de planetas gigantes do nosso Sistema Solar (veja a trajetória azul na Figura 4). Esse tipo de acreção é particularmente eficiente para embriões que se encontram além da linha de neve, onde os seixos são maiores devido à presença de gelo. Em contraste, a acreção de seixos nas regiões mais próximas ao Sol é consideravelmente mais lenta, pois a evaporação do gelo reduz o tamanho dos grãos de poeira [5].

Nota-se que a acreção de planetesimais não é eficaz para formar grandes embriões planetários, porque a gravidade dos núcleos em crescimento tende a dispersar os planetesimais. Enquanto a acreção de seixos permite que planetesimais maiores cresçam para embriões com 10 massas terres-

tres em menos de um milhão de anos. Esse crescimento rápido é crucial para explicar a formação de planetas gasosos, uma vez que os discos proto-planetários gasosos duram apenas alguns milhões de anos antes de se dissiparem [5, 13].

A acreção de seixos, no entanto, tem um limite e é interrompida quando o embrião, agora também chamado de núcleo, atinge cerca de 10 massas terrestres [13], conhecido como a massa de isolamento de seixos. Nesse ponto, o núcleo cria uma barreira de pressão que restringe a acumulação de mais material e inicia a contração da envoltória gasosa [5]. No modelo de acreção de seixos, os planetas gigantes podem experimentar mudanças significativas em suas posições iniciais, migrando seu semi-eixo orbital maior à medida que crescem. [13].

4.3 Acreção de gás e migração orbital de planetas gigantes

A acreção de gás e a migração orbital são processos cruciais na fase final de formação dos planetas gigantes, contribuindo para a explicação de suas massas, composições e posições orbitais.

Quando um embrião atinge a massa crítica



Figura 5: Essa imagem do *Telescópio Espacial Hubble* mostra uma lacuna em um disco protoplanetário de poeira e gás que orbita a estrela anã vermelha TW Hydrae. A lacuna provavelmente é causada pelos efeitos de um planeta em formação, ainda não detectado, que está gravitacionalmente atraindo material e esculpindo uma faixa no disco. Para revelar a estrutura do disco, os astrônomos usaram um dispositivo de mascaramento na câmera do *Hubble*, bloqueando a intensa luz da estrela localizada no centro da imagem. Crédito: NASA, ESA, J. Debes (STScI), H. Jang-Condell (Universidade de Wyoming), A. Weinberger (Instituição Carnegie de Washington), A. Roberge (Centro de Voos Espaciais Goddard), G. Schneider (Universidade do Arizona/Observatório Steward) e A. Feild (STScI/AURA).

(massa de isolamento de seixos) o processo de acreção de gás acelera, desencadeando um crescimento rápido desse protoplaneta [11, 14]. À medida que esse protoplaneta cresce, uma lacuna no disco de gás se abre (veja Figura 5), restringindo a quantidade de material disponível para acreção [5].

Os planetas gigantes gasosos e os gigantes de gelo possuem núcleos semelhantes, mas diferem na quantidade de gás acumulado. Júpiter e Saturno, os gigantes gasosos, têm a maior parte de sua massa composta por gás, enquanto os gigantes de gelo têm apenas uma fina camada de gás sobre um núcleo sólido. Essa diferença é resultado da velocidade de crescimento dos núcleos: núcleos que cresceram mais rapidamente acumularam grandes quantidades de gás, enquanto aqueles com crescimento mais lento capturaram menos gás antes da dissipação do disco gasoso [5].

Ao perturbar a densidade do disco gasoso ao seu redor, tanto dentro quanto fora de sua órbita [15], os protoplanetas recebem um torque em sua órbita, o que pode resultar em dois cenários

possíveis: o protoplaneta pode ganhar energia orbital e expandir sua órbita, ou, mais comumente, perder energia orbital e reduzir sua órbita [5]. Esse fenômeno é conhecido como migração orbital. Em geral, acredita-se que planetas gigantes migram para dentro durante sua formação.

4.4 Instabilidade, impactos e acreção tardia

A instabilidade dinâmica dos protoplanetas pode ser extremamente violenta. Com o tempo, a dispersão desses corpos pode levar a órbitas que se cruzam, resultando tanto em colisões quanto em mudanças significativas em suas órbitas [5]. Um exemplo notável desse tipo de colisão foi o impacto gigante onde um corpo do tamanho de Marte colidiu com a Terra, levando à formação da Lua [5, 11, 16, 17].

Além de colisões, as instabilidades podem causar alterações na órbita de um planeta, fazendo com que ele seja ejetado do sistema estelar. Uma vez ejetado, o planeta pode não retornar, pois não há força gravitacional suficiente para atraí-lo de volta. Esse fenômeno está associado à presença de planetas errantes, que são planetas que não orbitam nenhuma estrela (veja Subseção 7.3).

Após a fase dos grandes impactos, a fase final de acreção dos planetas terrestres, conhecida como acreção tardia, continua com a agregação de planetesimais e embriões. Estima-se que cerca de 0,5% da massa da Terra tenha sido acumulada durante a acreção tardia de planetesimais após o grande impacto que formou a Lua [18, 19]. A acreção tardia marca o último passo na formação da Terra.

5 Origem da Lua

A formação do satélite natural mais próximo de nós, a nossa Lua, ainda é debatida. O modelo mais aceito propõe que ela se formou após um impacto gigante entre a Terra e um embrião planetário do tamanho de Marte [5, 11, 16, 17]. Esse impacto lançou detritos que rapidamente se resfriaram e se consolidaram, formando a Lua [11, 20]. Essa explicação é corroborada pelo fato de que a Lua tem uma composição muito semelhante ao manto terrestre [5, 19] e possui cerca de um quarto do tamanho e 1/80 da massa da Terra [5].

A origem da Lua é apenas uma das maneiras de formação de satélites naturais. Alguns satélites se formam simultaneamente na mesma região do disco protoplanetário que gerou seu planeta, enquanto outros são asteroides capturados e possivelmente fragmentados.

6 Asteroides e cometas

Tanto os asteroides quanto os cometas são remanescentes da formação do Sistema Solar, formados a partir do material que não se incorporou a corpos maiores. A principal distinção entre eles está em suas órbitas. Asteroides geralmente orbitam na parte interna do Sistema Solar, enquanto os cometas, ao entrarem nessa região, estão apenas de passagem [5].

A maioria dos asteroides é encontrada no Cinturão de Asteroides, uma região entre Marte e Júpiter. Estima-se que esse cinturão abrigue mais de um milhão de asteroides com diâmetro superior a 1 km [21, 22]. Apesar dessa grande quantidade, a massa total dos asteroides é inferior a um milésimo da massa da Terra [5].

Existem duas principais hipóteses sobre a origem do Cinturão de Asteroides: uma sugere uma grande população inicial de asteroides que foi gradualmente reduzida, enquanto outra propõe uma introdução tardia dos asteroides nessa região, que foram redirecionados pelo campo gravitacional de planetas gigantes [5, 23]. De qualquer forma, os asteroides se originaram durante a formação do Sistema Solar, a partir dos materiais disponíveis no disco protoplanetário, sendo uma mistura de objetos resultantes da coagulação de poeira e fragmentos de outros corpos.

Os cometas são corpos menores que se formaram além da "linha de neve", originando-se em duas regiões principais: o Cinturão de Kuiper e a Nuvem de Oort [5, 24] (veja Figura 6). O Cinturão de Kuiper é a principal fonte de cometas que orbitam próximos ao plano da eclíptica, enquanto a Nuvem de Oort é responsável pelos cometas de longo período, que possuem uma ampla variedade de inclinações orbitais [5, 24].

O Cinturão de Kuiper é uma região⁸ que se estende desde Netuno, a aproximadamente 30 UA,⁹

⁸Plutão, o planeta-anão, está localizado nessa região.

⁹UA é a sigla para "unidade astronômica". É uma uni-

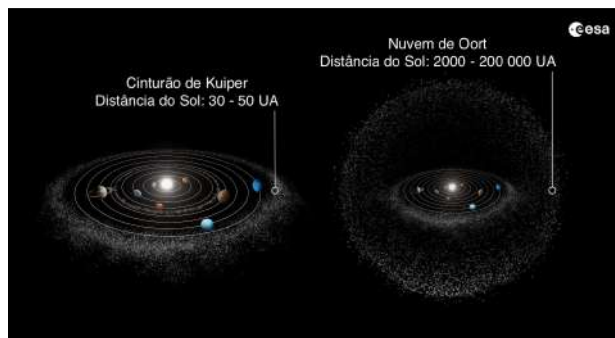


Figura 6: Ilustração mostrando os dois principais reservatórios de cometas no Sistema Solar: o Cinturão de Kuiper, a uma distância de 30–50 unidades astronômicas (UA: a distância Terra–Sol) do Sol, e a Nuvem de Oort, que pode se estender até 2 000–200 000 UA do Sol. Crédito: ESA.

até 50 UA do Sol, sendo uma coleção de relíquias de centenas de milhares de planetesimais formados em um processo de instabilidade [25]. Ele é mais largo e mais denso que o Cinturão de Asteroides, e sua massa total é estimada em aproximadamente 6% da massa da Terra [26]. Já a Nuvem de Oort é descrita como uma vasta esfera que encapsula todo o nosso sistema planetário, situada entre 2000 e 200000 UA do Sol [27]. Considerada a região mais distante do Sistema Solar, é onde a luz do Sol leva aproximadamente um ano terrestre para chegar. Embora as estimativas ainda não sejam precisas, acredita-se que a Nuvem de Oort contenha aproximadamente um trilhão de objetos, com uma massa total em torno de 5 vezes a massa da Terra [28, 29].

Embora mais distante, a Nuvem de Oort foi a primeira a ser teorizada como a origem dos cometas [24, 27]. Posteriormente, propôs-se a existência de uma segunda região, em formato de toroide,¹⁰ correspondente ao Cinturão de Kuiper [24]. Durante a instabilidade planetária, muitos pequenos corpos foram ejetados do Sistema Solar, mas alguns sobreviveram em nichos quase estáveis. Modelos indicam que a Nuvem de Oort e o Cinturão de Kuiper abrigam a maioria dos planetesimais e fragmentos remanescentes da formação do nosso Sistema Solar [24].

dade de comprimento equivalente à distância aproximada da Terra ao Sol, que corresponde a cerca de 150 milhões de quilômetros.

¹⁰Formato semelhante ao de um donut ou pneu.

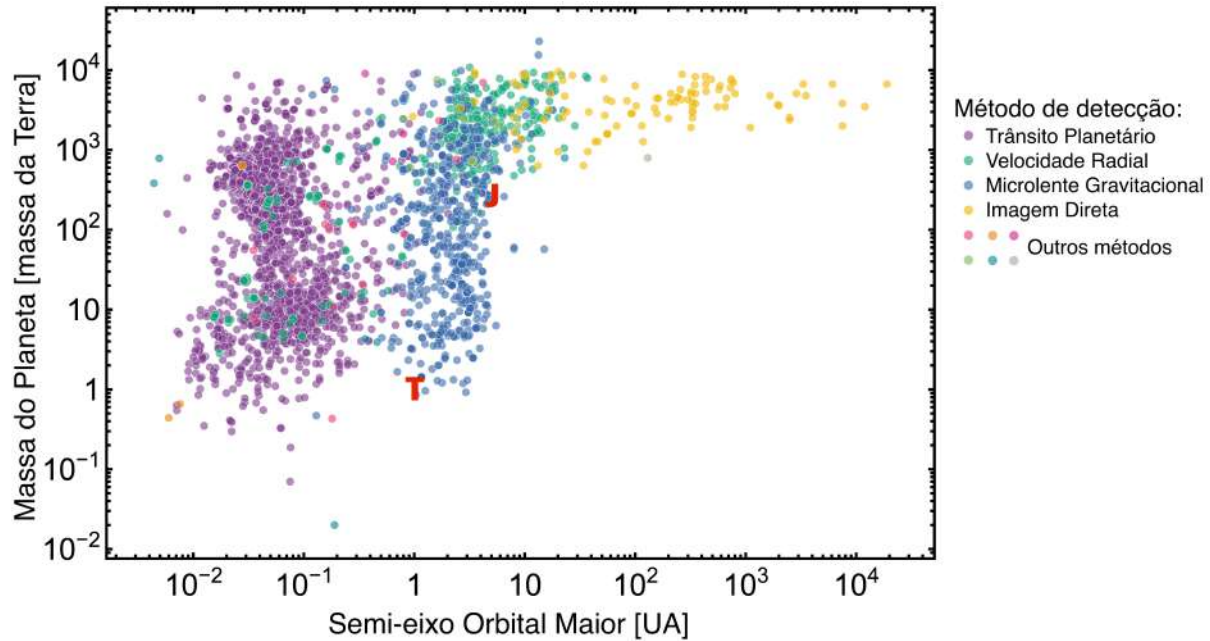


Figura 7: Distribuição de todos os exoplanetas detectados até 18 de agosto de 2024, com dados do NASA Exoplanet Archive [3]. A Terra (T) e Júpiter (J) foram incluídos para comparação. Se o nosso Sol fosse observado de outro sistema planetário com a tecnologia atual, provavelmente apenas Júpiter teria sido detectado. Esse cenário, no entanto, promete mudar com o telescópio *Roman*.

7 Discussão: outros sistemas planetários

Analisar outros sistemas planetários é extremamente importante para ampliar nossa compreensão da formação e evolução do nosso próprio Sistema Solar. É importante notar que, embora alguns experimentos possam ser realizados em laboratórios, criar – no sentido literal – diversos sistemas planetários para testar hipóteses não é possível para nós. Portanto, os dados observacionais de outros sistemas planetários cumprem parcialmente esse papel.

Comparar sistemas planetários a diferentes distâncias e localizações na galáxia nos permite identificar processos comuns na formação planetária e destacar variações decorrentes dos diferentes ambientes de formação. Essa análise também oferece uma valiosa perspectiva temporal, permitindo a observação de sistemas com diferentes idades. Como a evolução dos astros ocorre em escalas de tempo muito longas para serem observadas diretamente, esses dados ajudam a preencher lacunas na nossa compreensão da formação e evolução planetária ao longo do tempo. Além disso, essas descobertas possibilitam investigar a habitabilidade em outros mundos e entender melhor a singularidade do planeta Terra.

7.1 Detecção de exoplanetas

A descoberta de planetas fora do nosso Sistema Solar, conhecidos como exoplanetas, é uma das mais significativas conquistas científicas do nosso tempo. Os primeiros exoplanetas foram descobertos na década de 1990 [30, 31], e sua importância foi reconhecida com o Prêmio Nobel de Física em 2019 [32]. Em apenas três décadas, milhares de exoplanetas foram detectados por diversos métodos. Mais de 98% das detecções de exoplanetas já feitas foram realizadas através dos seguintes métodos:

- **Trânsito Planetário:** Quando alinhado ao campo de visão do observador, um exoplaneta que passa na frente de sua estrela hospedeira pode causar uma diminuição detectável no brilho de sua estrela. [33].
- **Velocidade Radial:** A presença de um planeta pode causar variações na velocidade da estrela hospedeira, fazendo com que ela se aproxime ou se afaste de nós periodicamente. Esse movimento provoca alterações na cor da luz da estrela, esse fenômeno é chamado de efeito Doppler [34].
- **Microlente Gravitacional:** Um sistema pla-

netário pode atuar como uma lente gravitacional, amplificando a luz de uma outra estrela ao fundo. A análise de como o brilho dessa outra estrela aumenta para o observador fornece informações sobre os componentes da lente que causou esse efeito [35].

- **Imagem Direta:** Em alguns casos, é possível observar diretamente os exoplanetas. Astrônomos frequentemente utilizam dispositivos para bloquear a luz da estrela hospedeira, o que pode revelar exoplanetas [36].

Apesar dos vieses observacionais, uma enorme diversidade de sistemas planetários já foi identificada (veja Figura 7). A descoberta de exoplanetas mostrou que sistemas planetários semelhantes ao nosso — com planetas rochosos internos e gigantes gasosos externos — são relativamente raros, representando apenas cerca de 1% dos sistemas conhecidos [5]. É importante notar que, se o nosso Sol fosse observado de outro sistema solar, com a tecnologia atual, provavelmente apenas Júpiter teria sido detectado. Isso não significa necessariamente que outros sistemas planetários como o nosso não existam, mas que a tecnologia atual ainda não permitiu uma detecção completa dos exoplanetas.

7.2 Demografia dos exoplanetas

Embora a maioria dos exoplanetas conhecidos tenha sido detectada por trânsitos, essa técnica se torna menos eficaz com o aumento da separação orbital entre a estrela e o planeta [33] (veja Figura 7). Em contraste, a detecção por microlentes é especialmente valiosa devido à sua sensibilidade a planetas de baixa massa e mais frios [37, 38], com distâncias orbitais geralmente entre 0,5 e 10 UA. Esse intervalo é fundamental para entender a teoria de acreção dos núcleos e, por conseguinte, a formação e evolução planetária [39–42].

A combinação das técnicas de trânsito e microlente permite a detecção de exoplanetas em uma ampla gama de razões entre massas de planetas e estrelas, bem como separações orbitais. Por essa razão, a NASA selecionou esses dois métodos para medir a demografia dos sistemas planetários, resultando em duas missões espaciais principais: *Kepler*,¹¹ focada na detecção de trânsitos

¹¹Lançado em 2009, o telescópio espacial *Kepler* foi apo-

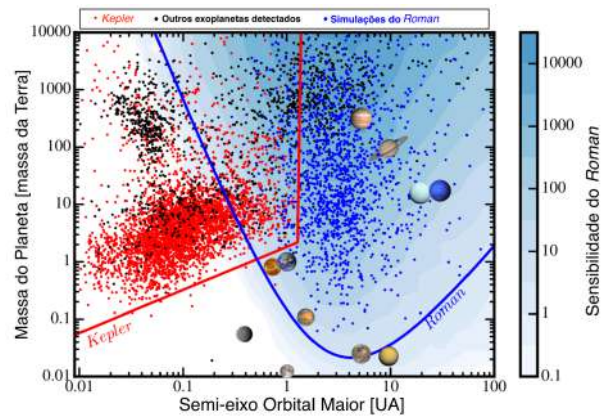


Figura 8: Comparação entre os exoplanetas detectados por trânsito pelo *Kepler* (pontos vermelhos) e outros exoplanetas conhecidos até 2019 (pontos pretos) com as detecções simuladas de microlentes gravitacionais para o *Roman* (pontos azuis). Também são mostrados os planetas do Sistema Solar, juntamente com a Lua, Titã e Ganímedes, para referência. As altas concentrações de detecções de planetas próximos à sua estrela hospedeira têm razões históricas, indicando um forte efeito de seleção devido à técnica empregada. Imagem adaptada de [43].

planetários, e a futura missão *Nancy Grace Roman* (*Roman*),¹² que tem como um dos objetivos principais a busca por exoplanetas através do método de microlente gravitacional. Essas missões fornecerão dados abrangentes sobre a frequência de planetas de diferentes massas em várias separações orbitais, oferecendo a base sólida mais completa para testar teorias de formação planetária [43] (veja Figura 8).

7.3 Planetas errantes

Pesquisas recentes estimam que existem trilhões de planetas errantes¹³ na nossa Galáxia [44], o que corrobora a teoria de que planetas podem ser expelidos de seus sistemas devido a instabilidades (visto na Subseção 4.4). Esses planetas errantes foram detectados por métodos de microlente [45] e também por imagens diretas [46]. Recentemente, foram observados pares de objetos com massa similar à de Júpiter (veja Figura 9). Essas descobertas oferecem novas perspectivas e confirmações sobre a diversidade e a dinâmica de formação de sistemas planetários.

sentado em 2018.

¹²O telescópio *Roman* é atualmente a missão espacial carro-chefe da NASA, com previsão de lançamento até maio de 2027.

¹³Planetas que não orbitam nenhuma estrela.



Figura 9: Subseção de uma imagem composta colorida de comprimento de onda curto do NIRcam do *Webb* apontando para a Nebulosa de Órion. A imagem tem o norte (N) para a esquerda e o leste (E) para baixo. Cinco objetos binários com massa próxima de Júpiter (JuMBOs) estão destacados. Crédito: JWST/NIRcam/Pearson & McCaughrean 2023 [46].

8 Conclusão

A formação do Sistema Solar ocorreu predominantemente durante os milhões de anos de vida do disco protoplanetário gasoso, definindo uma janela temporal limitada para a formação planetária. Os principais corpos do nosso sistema planetário incluem o Sol e seus oito planetas (Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno), além de corpos menores como asteroides, cometas e satélites planetários, todos originados do material de uma nuvem de gás na Via Láctea. Apesar do extenso conhecimento que possuímos sobre o nosso Sistema Solar, ainda há muitos aspectos a serem explorados e teorias a serem confirmadas ou refutadas.

Quando olhamos para fora, o Sistema Solar representa apenas cerca de 1% dos sistemas planetários conhecidos até agora, sugerindo que sua configuração é relativamente incomum. Isso nos desafia a tentar compreender quais são os fatores com maior impacto na definição das características dos sistemas durante o período de formação.

Essa raridade do Sistema Solar também influencia a busca por mundos habitáveis, pois implica que há uma probabilidade menor de se encontrar planetas semelhantes à Terra exatamente em sistemas parecidos com o nosso. Isso nos leva a reconsiderar onde procurar por vida fora da Terra e repensar se os sistemas planetários mais promissores de hospedar vida podem não replicar exatamente a configuração do Sistema Solar. Isso abre o questionamento de quais seriam as características essenciais que deveríamos analisar para identificar ambientes capazes de sustentar a vida.

Além de destacar a singularidade do Sistema Solar, a diversidade observada em outros sistemas planetários reflete a ampla gama de configurações possíveis em nossa Galáxia, oferecendo perspectivas valiosas sobre a formação e evolução planetária. Esse conhecimento enriquece nosso entendimento sobre a origem e o futuro da Terra e do Sistema Solar. Embora o campo de descobertas de exoplanetas ainda seja recente e apresente certos vieses, futuros telescópios como o *Roman* prometem desvendar novos mundos, talvez com características mais próximas das nossas.

Por fim, atualmente, os objetos no nosso Sistema Solar são os únicos que podemos explorar diretamente com equipamentos humanos. Por-

tanto, assim como usamos dados de exoplanetas para complementar nosso entendimento do Sistema Solar, o conhecimento do nosso sistema também nos ajuda a aprofundar a compreensão das estrelas e planetas em nossa Galáxia. Este conhecimento é crucial para obter uma visão abrangente dos objetos que compõem o nosso Universo.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe, Liana Ishitani Silva, pelos seus valiosos comentários sobre este manuscrito. A pesquisa de Stela Ishitani Silva é conduzida no site NASA Goddard Space Flight Center e apoiada pela fellowship concedida pelo NASA Postdoctoral Program e administrada pela Oak Ridge Associated Universities sob contrato com a NASA.

Sobre a autora

Stela Ishitani Silva (stela.ishitanisilva@nasa.gov) é *postdoctoral fellow* na NASA GSFC. Obteve seu Bacharelado em Física pela Universidade Federal de Minas Gerais e seu Mestrado e Doutorado em Física pela Catholic University of America nos Estados Unidos. É co-autora da descoberta de mais de 30 exoplanetas utilizando a técnica de microlente gravitacional e de mais de 180 candidatos a trânsito planetário. Durante o seu doutorado, liderou a descoberta do exoplaneta MOA-2020-BLG-135Lb e foi também agraciada com o John Mather Nobel Scholar Award. Atualmente conduz implementação de aprendizado de máquina para a detecção de variabilidades estelares e faz parte da colaboração Microlensing Observations in Astrophysics e da equipe responsável pelo levantamento de exoplanetas que serão descobertos com o Roman Space Telescope.

Referências

- [1] S. Pfalzner et al., *The formation of the solar system*, *Physica Scripta* **90**(6), 068001 (2015).
- [2] M. Xiang e H.-W. Rix, *A time-resolved picture of our Milky Way's early formation history*, *Nature* **603**(7902), 599 (2022).

- [3] National Aeronautics and Space Administration, California Institute of Technology e Exoplanet Exploration Program, *NASA Exoplanet Archive*. Disponível em <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>, acesso em ago. 2024.
- [4] NASA Science Activation program, *Basics of Space Flight - Chapter 1: The Solar System*. Disponível em <https://science.nasa.gov/learn/basics-of-space-flight/chapter1-1/>, acesso em jul. 2024.
- [5] S. N. Raymond, *The Solar System: structural overview, origins and evolution* (2024). [ArXiv:2404.14982](https://arxiv.org/abs/2404.14982).
- [6] D. R. Williams, *NASA: Planetary Fact Sheet - Metric*. Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>, acesso em ago. 2024.
- [7] F. C. Adams, *The birth environment of the solar system*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **48**(1), 47 (2010).
- [8] M. Marov, *The Formation and Evolution of the Solar System*, *Oxford Research Encyclopedia of Planetary Science* (2018).
- [9] NASA Science, *Finding Planetary Construction Zones*. Disponível em <https://science.nasa.gov/mission/hubble/science/science-highlights/finding-planetary-construction-zones/>, acesso em ago. 2024.
- [10] T. Lichtenberg et al., *Bifurcation of planetary building blocks during Solar System formation*, *Science* **371**(6527), 365 (2021).
- [11] P. J. Armitage, *Astrophysics of Planet Formation* (Cambridge University Press, 2020).
- [12] A. Johansen e M. Lambrechts, *Forming planets via pebble accretion*, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* **45**(1), 359 (2017).
- [13] J. P. Williams e L. A. Cieza, *Protoplanetary disks and their evolution*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **49**(1), 67 (2011).
- [14] J. B. Pollack et al., *Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas*, *Icarus* **124**(1), 62 (1996).
- [15] W. Kley e R. Nelson, *Planet-disk interaction and orbital evolution*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **50**(1), 211 (2012).
- [16] R. M. Canup, *Simulations of a late lunar-forming impact*, *Icarus* **168**(2), 433 (2004).
- [17] W. Benz, W. Slattery e A. Cameron, *The origin of the Moon and the single-impact hypothesis I*, *Icarus* **66**(3), 515 (1986).
- [18] J. M. D. Day e M. Paquet, *Temporally limited late accretion after core formation in the Moon*, *Meteoritics & Planetary Science* **56**(4), 683 (2021).
- [19] R. J. Walker, *Highly siderophile elements in the Earth, Moon and Mars: update and implications for planetary accretion and differentiation*, *Geochemistry* **69**(2), 101 (2009).
- [20] E. Kokubo, S. Ida e J. Makino, *Evolution of a circumterrestrial disk and formation of a single Moon*, *Icarus* **148**(2), 419 (2000).
- [21] F. DeMeo e B. Carry, *The taxonomic distribution of asteroids from multi-filter all-sky photometric surveys*, *Icarus* **226**(1), 723 (2013).
- [22] F. E. DeMeo et al., *The compositional structure of the asteroid belt*, in *Asteroids IV*, editado por P. Michel, F. E. DeMeo e W. F. Bottke (University of Arizona Press, 2015), 13–42.
- [23] D. Nesvorný et al., *Isotopic trichotomy of main belt asteroids from implantation of outer solar system planetesimals*, *Earth and Planetary Science Letters* **626**, 118521 (2024).
- [24] W. C. Fraser et al., *The Transition from the Kuiper Belt to the Jupiter-Family (Comets)* (2022). [ArXiv:2210.16354](https://arxiv.org/abs/2210.16354).
- [25] A. Morbidelli e D. Nesvorný, *Kuiper belt: formation and evolution*, in *The Trans-Neptunian Solar System*, editado por D. Pralnik, M. A. Barucci e L. A. Young (Elsevier, 2020), 25–59.

- [26] A. Di Ruscio et al., *Analysis of Cassini radio tracking data for the construction of INPOP19a: A new estimate of the Kuiper belt mass*, *Astronomy & Astrophysics* **640**, A7 (2020).
- [27] J. H. Oort, *The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin*, *BAIN* **11**, 91 (1950).
- [28] S. Torres et al., *Galactic tide and local stellar perturbations on the Oort cloud: creation of interstellar comets*, *Astronomy & Astrophysics* **629**, A139 (2019).
- [29] D. Jewitt, *Kuiper Belt and comets: An observational perspective*, in *Trans-Neptunian Objects and Comets*, editado por D. Jewitt, A. Morbidelli e H. Rauer (Springer, 2008), 1–78.
- [30] A. Wolszczan e D. A. Frail, *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, *Nature* **355**(6356), 145 (1992).
- [31] M. Mayor e D. Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, *nature* **378**(6555), 355 (1995).
- [32] *The Nobel Prize in Physics 2019*. Disponível em <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2019/summary/>, acesso em ago. 2024.
- [33] J. N. Winn, *Exoplanet transits and occultations*, in *Exoplanets*, editado por S. Seager (University of Arizona Press, 2010), 55–77. [ArXiv:1001.2010](https://arxiv.org/abs/1001.2010).
- [34] C. Lovis e D. Fischer, *Radial velocity techniques for exoplanets*, in *Exoplanets*, editado por S. Seager (University of Arizona Press, 2010), 27–53.
- [35] S. Mao e B. Paczynski, *Gravitational microlensing by double stars and planetary systems*, *The Astrophysical Journal* **374**, L37 (1991).
- [36] G. Chauvin et al., *A giant planet candidate near a young brown dwarf-direct VLT/NACO observations using IR wavefront sensing*, *Astronomy & Astrophysics* **425**(2), L29 (2004).
- [37] D. P. Bennett e S. H. Rhie, *Detecting Earth-mass planets with gravitational microlensing*, *The Astrophysical Journal* **472**(2), 660 (1996).
- [38] A. Gould e A. Loeb, *Discovering Planetary Systems through Gravitational Microlenses*, *The Astrophysical Journal* **396**, 104 (1992).
- [39] J. J. Lissauer, *Planet formation*, *Annual review of astronomy and astrophysics* **31**(1), 129 (1993).
- [40] S. Ida e D. N. Lin, *Toward a deterministic model of planetary formation. I. A desert in the mass and semimajor axis distributions of extrasolar planets*, *The Astrophysical Journal* **604**(1), 388 (2004).
- [41] G. M. Kennedy, S. J. Kenyon e B. C. Bromley, *Planet formation around low-mass stars: the moving snow line and super-Earths*, *The Astrophysical Journal* **650**(2), L139 (2006).
- [42] M. Ali-Dib, A. Cumming e D. N. C. Lin, *The effect of late giant collisions on the atmospheres of protoplanets and the formation of cold sub-Saturns*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **509**(1), 1413 (2022).
- [43] M. T. Penny et al., *Predictions of the WFIRST Microlensing Survey. I. Bound Planet Detection Rates*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **241**(1), 3 (2019). [ArXiv:1808.02490](https://arxiv.org/abs/1808.02490).
- [44] T. Sumi et al., *Free-floating Planet Mass Function from MOA-II 9 yr Survey toward the Galactic Bulge*, *The Astronomical Journal* **166**(3), 108 (2023). [ArXiv:2303.08280](https://arxiv.org/abs/2303.08280).
- [45] N. Koshimoto et al., *Terrestrial- and Neptune-mass Free-Floating Planet Candidates from the MOA-II 9 yr Galactic Bulge Survey*, *The Astronomical Journal* **166**(3), 107 (2023). [ArXiv:2303.08279](https://arxiv.org/abs/2303.08279).
- [46] S. G. Pearson e M. J. McCaughrean, *Jupiter mass binary objects in the Trapezium cluster* (2023). [ArXiv:2310.01231](https://arxiv.org/abs/2310.01231).

Sob a influência do Sol: como o clima espacial afeta nosso planeta

Adriana Valio

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Resumo

Nossa estrela, o Sol, apresenta atividade magnética na forma de manchas escuras em sua superfície, além de produzir explosões e ejeções de massa de sua atmosfera. Este artigo explora a dinâmica do Sol e seus efeitos no Sistema Solar, particularmente na Terra. A atmosfera solar, que inclui a fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa, juntamente com o vento solar desempenham um papel crucial na compreensão da atividade solar. O campo magnético do Sol, fonte de energia de toda a atividade, é discutido em detalhe, incluindo as manchas solares e seu ciclo de 11 anos, além dos grandes mínimos como o Mínimo de Maunder e seu impacto no clima terrestre. As explosões solares e ejeções de massa coronais são o principal fator do clima espacial, afetando vários aspectos do ambiente do nosso planeta. Partículas energéticas de explosões e ejeções de massa interagem com a magnetosfera da Terra, causando tempestades geomagnéticas que podem impactar significativamente os sistemas tecnológicos. Estas tempestades podem causar falhas em satélites, interrupções em sistemas de comunicação, apagões e auroras, além de afetar a ionosfera. Compreender os fenômenos da atividade solar é essencial para melhorar as previsões do clima espacial e mitigar os impactos dos eventos solares sobre a tecnologia e infraestrutura modernas.

Abstract

Our star, the Sun, exhibits magnetic activity in the form of dark spots on its surface, and also produces flares and mass ejections from its atmosphere. This article delves into the dynamics of the Sun and its effects on the Solar System, especially on Earth. The solar atmosphere, which includes the photosphere, chromosphere, transition region, and corona, along with the solar wind play a crucial role in understanding solar activity. The Sun's magnetic field, the energy source of solar activity, is discussed in detail, including sunspots and the 11-year cycle, as well as notable grand minima such as the Maunder Minimum and its impact on Earth's climate. Solar flares and coronal mass ejections are major drivers of space weather, affecting various aspects of the Earth's environment. Energetic particles from flares and mass ejections interact with the terrestrial magnetosphere, leading to geomagnetic storms that can significantly impact technological systems. These storms can cause satellite malfunctions, communication systems failures, blackouts, and auroras, as well as affect the ionosphere. Understanding solar active phenomena is essential for improving space weather predictions and mitigating the impacts of solar-related events on modern technology and infrastructure.

Palavras-chave: Sol, atmosfera solar, atividade solar, clima espacial, tempestades geomagnéticas.

Keywords: Sun, solar atmosphere, solar activity, space weather, geomagnetic storms.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45935](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45935)

1 Introdução

O Sol, nossa estrela central e principal fonte de energia, determina o ambiente do Sistema Solar. Sua atmosfera, composta pela fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa, é palco dos fenômenos mais energéticos do Sistema Solar, tais como explosões e ejeções de massa. O vento solar que emana da coroa é um fluxo contínuo de partículas que molda a heliosfera e interage com

os planetas, cometas e outros corpos do Sistema Solar.

O campo magnético solar, com sua estrutura complexa e dinâmica, é a fonte de energia de toda a atividade solar, como as explosões e as ejeções de massa. Atividade esta que determina o clima espacial, afetando tanto o nosso planeta quanto os outros planetas do Sistema Solar. Por causa do processo de dínamo que rege o campo magnético

do Sol, toda atividade solar varia periodicamente com um ciclo de 11 anos. Tanto a ocorrência de manchas solares, quanto de explosões e ejeções de massa seguem este ciclo, aumentando e diminuindo com um período de 11 anos. Exceções a este ciclo ocorrem esporadicamente perfazendo períodos de décadas quando não foi detectada quase nenhuma atividade solar. Estes períodos são conhecidos como Grandes Mínimos, do qual o de Maunder é o mais famoso.

Embora não seja uma estrela especialmente ativa em comparação com as demais estrelas, suas explosões e ejeções de massa podem ter consequências danosas para a Terra e nossa sociedade altamente dependente de tecnologia. O primeiro evento registrado, denominado Carrington, ocorreu em 1859 e foi o mais energético que se tem notícia. Outros eventos de impacto foram o apagão na cidade de Quebec em 1989 e a perda de satélites de comunicação.

Neste artigo, exploraremos as camadas atmosféricas do Sol, a natureza do seu campo magnético, o impacto da atividade solar, e como tudo isso contribui para o clima espacial que afeta o nosso planeta.

2 Atmosfera solar

O Sol emite radiação em todo o espectro eletromagnético, das ondas de rádio com comprimentos de km até os raios X com comprimentos de onda de 10^{-12} m [1]. Porém a maior parte do fluxo solar se dá principalmente na faixa do espectro visível (400 - 700 nm), fazendo com que o Sol tenha um aspecto amarelado, além do infravermelho (700 - 50.000 nm). Entretanto, cada uma das camadas da atmosfera solar emite em intervalos específicos de comprimento de onda, dependendo de sua temperatura e densidade. Portanto, a aparência do Sol varia de acordo com o instrumento utilizado para sua observação.

A atmosfera, assim como o interior solar, é composta em número basicamente de Hidrogênio (91,2%), Hélio (8,7%) e outros elementos (0,1%) [2]. As camadas da atmosfera solar têm estruturas distintas, cada uma com suas características únicas de densidade e temperatura. Para fins didáticos, separamos as camadas em fotosfera, cromosfera, região de transição e coroa que serão de-

talhadas a seguir.

2.1 Fotosfera

A fotosfera, ou esfera de luz em grego, também considerada a superfície do Sol, é a parte que podemos ver com nossos olhos.¹ A luz e calor que nos envolve provém da fotosfera solar, sendo a camada mais baixa da atmosfera solar, mas de onde se origina a maior parte do fluxo solar. A radiação oriunda da fotosfera se dá predominante na faixa do visível do espectro eletromagnético (Figura 1).

Com uma espessura de pouco mais de 300 km, a fotosfera é uma camada completamente opaca à radiação na sua parte inferior, se transformando para completamente transparente na parte de cima. Isto ocorre porque tanto a densidade quanto a temperatura do plasma diminuem com a altitude nesta camada. Em sua base, a fotosfera tem uma temperatura efetiva de cerca de 5780 K e densidade de 2×10^{-4} kg cm⁻³ [3,4]. É a camada mais fria de toda a atmosfera solar.

Na fotosfera estão localizadas as manchas solares, que são áreas mais frias e escuras devido à concentração de fortes campos magnéticos. A temperatura das partes mais escuras das manchas é da ordem de 1000 a 1900 K mais fria do que a fotosfera ao redor [5]. As manchas serão mais detalhadas na Seção 4.1.

Já as fáculas são regiões brilhantes, geralmente localizadas em torno de manchas solares ou em áreas da fotosfera onde o campo magnético é maior. Ao contrário das manchas, as fáculas são visíveis como áreas mais claras e brilhantes na superfície solar, em relação à fotosfera circundante. As fáculas são mais facilmente observadas nas bordas do disco solar, onde o contraste com a fotosfera é maior.

2.2 Cromosfera

Localizada logo acima da fotosfera, a cromosfera, ou esfera de cor em grego, tem uma espessura de cerca de 2500 - 3000 km [6,7], e é mais difícil de ser observada diretamente, sendo visível

¹Nunca olhe diretamente para o Sol sem o uso de proteção adequada, como filtros solares certificados ou óculos de proteção específicos para observação solar. Porém é seguro olhar diretamente quando o Sol estiver no horizonte, ao amanhecer ou entardecer.

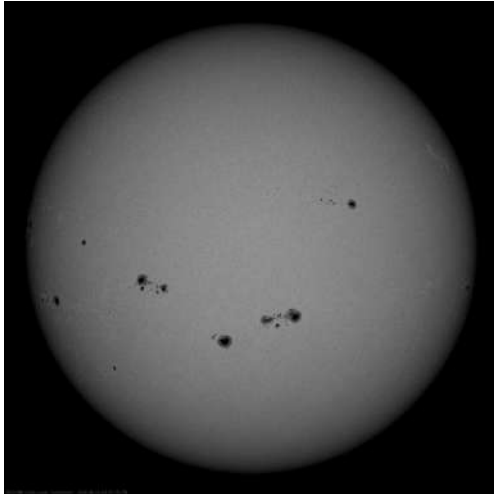


Figura 1: Imagem do Sol em luz visível obtida pelo instrumento Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) do Solar Dynamics Observatory (SDO) em 21 de agosto de 2024. Fonte: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>.

principalmente durante eclipses solares, quando aparece como um anel avermelhado ao redor do Sol. A temperatura da cromosfera aumenta com a altitude, variando do mínimo de temperatura de 4200 em sua base até cerca de 40.000 K na parte superior [3]. Já a densidade decresce de 5×10^{-6} para $10^{-11} \text{ kg m}^{-3}$ [3].

A cor avermelhada da cromosfera, observada durante eclipses solares (painel superior à esquerda da Figura 2), deve-se à sua composição predominante do gás hidrogênio. A emissão de luz vermelha ocorre em um comprimento de onda específico, conhecido como H-alfa (656,3 nm), quando o elétron do átomo de hidrogênio decai do nível 3 para o nível 2, liberando energia. Rotineiramente é possível visualizar a cromosfera utilizando um filtro H-alfa que deixa passar somente a luz em torno deste comprimento de onda (painel superior à direita da Figura 2).

Por outro lado, devido à densidade e temperatura da cromosfera, a mesma pode ser observada em frequências de rádio, mais especificamente micro-ondas e ondas milimétricas. Imagens reconstruídas das observações em 230 GHz do ALMA (Chile) e em 17 GHz do interferômetro de Nobeyama (Japão) são mostradas nos painéis inferiores da Figura 2, à esquerda e à direita, respectivamente.

As proeminências ou filamentos solares são estruturas também observadas na atmosfera do Sol, especificamente na cromosfera. Embora se-

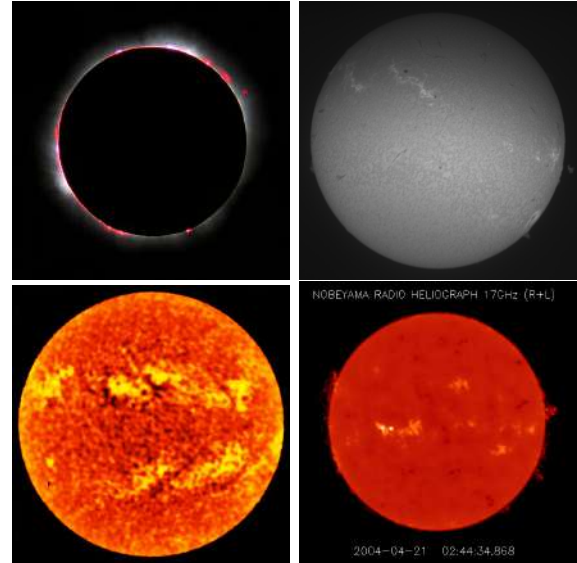


Figura 2: Superior à esquerda: Eclipse solar de 11 de agosto de 1999, tirada na França por Luc Viatour. Superior à direita: Imagem do Sol em H-alfa de 20 de agosto de 2024, obtida no Observatório Solar Mackenzie. Inferior à esquerda: Mapa rádio do Sol em 230 GHz do Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), obtido pela técnica de *fast-scanning* no dia 17 de dezembro de 2015. Inferior à direita: Mapa rádio do Sol em 17 GHz pelo Rádio Heliógrafo de Nobeyama (Japão) em 21 de abril de 2004 a partir de interferometria.

jam essencialmente o mesmo fenômeno, a forma como são vistas a partir da Terra determina o termo usado: “proeminências” quando vistas projetando-se para fora do limbo solar, e “filamentos” quando observados contra o disco solar. A sequência diária de fotos H-alfa mostrada na Figura 3 evidencia o exemplo de uma proeminência primeiramente avistada no limbo oeste do Sol e que com a rotação solar passou a ser vista contra o disco solar e, portanto, como filamento.

Os filamentos solares parecem linhas escuras serpenteando sobre a superfície do Sol, devido ao contraste com o fundo mais brilhante da fotosfera. Aparentam ser escuros pois o plasma da proeminência é mais frio (6.000 - 14.000 K, [8]) e denso do que a atmosfera subjacente, fazendo com que absorvam mais luz do que emitem. Geralmente, os filamentos se formam em regiões onde os campos magnéticos do Sol formam estruturas que os suportam contra sua gravidade. Alguns filamentos são estáveis e permanecem por longos períodos de tempo. Porém eventualmente, pode ocorrer destes arcos magnéticos se tornarem instáveis e o filamento ser ejetado para o meio interplane-

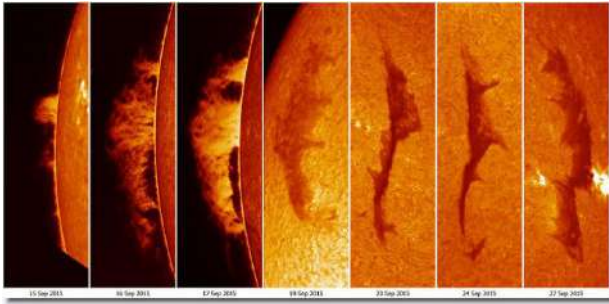


Figura 3: Sequência de imagens dos dias 15 a 27 de setembro de 2015 de uma proeminência no limbo oeste do Sol, que posteriormente é vista como um filamento devido à rotação solar. Fonte: <https://www.cloudynights.com/topic/513515-march-of-the-prominence-filament/>.

tário, podendo contribuir para o clima espacial.

As proeminências solares são enormes estruturas de plasma (gás ionizado) que se estendem para fora da superfície do Sol (primeiras 3 imagens à esquerda da Figura 3). Típicos valores de comprimento são centenas de milhares de quilômetros, por 5000 km de espessura [3]. Embora se localizem na cromosfera, estão ancoradas na fotosfera e são vistas como arcos brilhantes que se destacam em contraste com o escuro do espaço ao redor do Sol.

2.3 Região de transição

Situada entre a cromosfera e a coroa, a região de transição é uma camada muito fina (~ 100 km) onde a temperatura aumenta drasticamente, passando de algumas dezenas de milhares de Kelvin para cerca de 1 milhão de Kelvin [1]. Esse aumento abrupto de temperatura ainda não é completamente compreendido e é conhecido como o problema do aquecimento coronal [9].

2.4 Coroa

A camada mais externa da atmosfera solar é a coroa, uma camada bastante inhomogênea que se estende por milhões de quilômetros no espaço e é composta por plasma extremamente quente, com temperaturas que podem ultrapassar 2 milhões de Kelvin. A coroa é visível durante eclipses totais do Sol como um halo brilhante ao redor da Lua (painel à esquerda da Figura 4). A coroa é muito menos densa do que a cromosfera ou fotosfera, o que contribui para sua aparência difusa.

Rotineiramente, a coroa pode ser observada

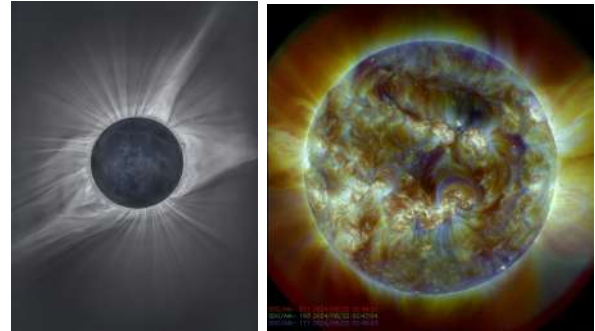


Figura 4: Esquerda: Eclipse solar em 21 de agosto de 2017, evidenciando a coroa solar. Direita: Composição de imagens em EUV (211 Å, 193 Å, 171 Å) do Atmospheric Imaging Assembly (AIA) do SDO em 22 de agosto de 2024.

em luz visível utilizando-se um coronógrafo. Coronógrafos são instrumentos ópticos projetados para observar a coroa solar, normalmente ofuscada pela luz intensa da fotosfera solar. Um coronógrafo usa um disco de ocultação para bloquear a luz da fotosfera solar, criando um eclipse artificial. Isto reduz a intensidade da luz direta do Sol, permitindo que a luz mais fraca da coroa solar, resultado do espalhamento da luz da fotosfera pelos elétrons da coroa, seja detectada.

Dada sua altíssima temperatura de milhões de K, o plasma coronal emite ondas de ultra-violeta extremo e raio X e, portanto, pode ser observada por satélites que operam nestes comprimentos de onda. A análise das imagens de raios X da coroa solar revela uma estrutura complexa e dinâmica, composta por arcos coronais e buracos coronais (painel à direita da Figura 4).

Um problema atual da física solar é a fonte do aquecimento da coroa [9]. Pois como é possível uma camada externa alcançar uma temperatura de milhões de K enquanto a fotosfera abaixo está a apenas 5780 K? Uma proposta para esta fonte de energia extra são as nanoflares [10], que existindo ao milhares poderiam suprir esta energia. Mas este assunto ainda é bastante debatido na comunidade científica.

3 Vento solar e heliosfera

Os ventos solares são fluxos contínuos de partículas carregadas (principalmente prótons, elétrons e partículas alfa - núcleos de He) que são expelidos da atmosfera superior do Sol, especialmente da sua coroa. A perda de massa

anual do Sol atualmente devido ao vento é de $2 \times 10^{-14} M_{\text{Sol}} \text{ yr}^{-1}$ [11]. O vento é gerado por causa da alta temperatura da coroa, que faz com que as partículas solares escapem da gravidade do Sol e se propaguem pelo espaço [12]. Isto se dá porque a energia cinética das partículas, graças à temperatura de milhões de K, ultrapassa a energia gravitacional do Sol.

A sonda espacial Ulysses (NASA e ESA) [13], lançada em outubro de 1990, operou por 18 anos e foi a primeira a sair do plano da eclíptica e sobrevoar os polos do Sol. Os dados da Ulysses mostrou que o vento solar apresentava dois regimes: o vento solar lento e o vento solar rápido, com quase o dobro da velocidade do lento [14]. Os dois tipos de vento diferem em sua velocidade, origem, composição e impacto no espaço interplanetário.

O vento solar lento se move a uma velocidade relativamente baixa, geralmente entre 300 e 500 km/s. A origem exata do vento solar lento é mais complexa e menos compreendida que a do vento rápido. Acredita-se que sua origem seja principalmente nas regiões equatoriais do Sol, onde o campo magnético tem uma configuração fechada. O vento lento é mais abundante em elementos pesados, como oxigênio e ferro, em comparação ao vento rápido. Além disso, possui uma maior variabilidade de temperatura e densidade.

Devido à sua velocidade mais baixa e variabilidade, o vento solar lento tem um impacto significativo no Clima Espacial, pois é capaz de interagir de maneira mais eficaz com o campo magnético da Terra. Desta forma tem uma maior contribuição para causar tempestades geomagnéticas e a ocorrência de auroras, além de afetar satélites em órbita da Terra e outras tecnologias.

Por outro lado, o vento solar rápido é caracterizado por velocidades muito maiores, variando de 600 a 800 km/s [13]. Este vento se origina nas regiões polares do Sol, nas áreas conhecidas como “buracos coronais”, que são regiões onde o campo magnético solar se abre diretamente para o espaço, permitindo que as partículas escapem mais facilmente em altas velocidades. Como resultado, o vento solar rápido é mais estável e uniforme. Além de ser também mais homogêneo em termos de composição, contendo uma menor proporção de elementos pesados em relação ao vento lento. O vento solar rápido tem efeitos distintos

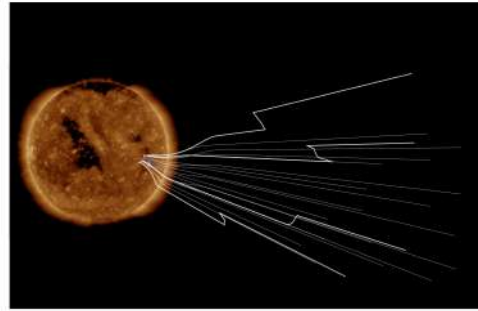


Figura 5: O Sol, em luz UV, durante a aproximação da Parker Solar Probe em sua primeira órbita a 35 raios solares. Linhas brancas do campo magnético são mostradas originando-se de um pequeno buraco coronal. Torções, baseadas em medições reais de Parker, mostram os ziguezagues observados durante o encontro. Fonte: <https://svs.gsfc.nasa.gov/13494/>

no espaço interplanetário. Devido à sua alta velocidade, pode criar frentes de choques e perturbações no meio interplanetário, afetando a propagação de raios cósmicos.

No espaço interplanetário, esporadicamente ocorrem interações entre o vento solar lento e o rápido [15], as quais podem afetar o nosso planeta. Quando o vento solar rápido alcança o vento lento, pode criar regiões de compressão, conhecidas como “regiões de interação corrotante”. Estas regiões de interação dos ventos aceleram partículas energéticas, modulam a intensidade dos raios cósmicos galácticos e podem desencadear tempestades geomagnéticas além de causar auroras boreais (no hemisfério norte) e austrais (no hemisfério sul).

Recentemente, em 2019, a sonda Parker Solar Probe da NASA [16], ao chegar a uma distância de apenas 35 raios solares do Sol, fez uma descoberta fascinante ao revelar a existência de fenômenos que ficaram conhecidos como *switchbacks* [17] nos ventos solares. Os *switchbacks* são reversões bruscas e rápidas no campo magnético do vento solar, que fazem com que o campo magnético mude temporariamente de direção, formando uma espécie de “S”, ou ziguezagues, no fluxo do vento solar (Figura 5). Estas complexas estruturas não são observadas no vento solar próximo à órbita da Terra.

A origem exata dos *switchbacks* ainda é desconhecida, mas acredita-se que esteja ligada à dinâmica complexa e às reconexões magnéticas na superfície do Sol ou na coroa solar. Estes *switch-*

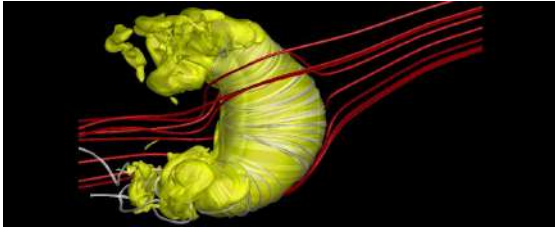


Figura 6: Estrutura da heliosfera como um *croissant* com jatos ao norte e ao sul. A superfície amarela representa a heliopausa, fronteira entre a heliosfera e o meio interestelar local. O Sol está localizado no centro desta bolha. As linhas cinzas ilustram as linhas do campo magnético solar, enquanto as linhas vermelhas representam o campo magnético interestelar [18].

backs podem desempenhar um papel importante na aceleração do vento solar e na transferência de energia do Sol para o espaço interplanetário.

A heliosfera é a região do espaço sob domínio do Sol e engloba todo o Sistema Solar, incluindo as órbitas dos planetas. Esta bolha é inflada pelo fluxo contínuo de partículas carregadas dos ventos e pelo campo magnético do Sol. A heliosfera pode ser visualizada como uma grande bolha com uma forma um tanto alongada, devido ao movimento do Sol através do espaço interestelar. Esta bolha é moldada pela interação entre o vento solar e o meio interestelar.

As duas sondas Voyager e a New Horizons são três espaçonaves que viajaram para os confins do Sistema Solar. Na verdade, as sondas Voyager até já cruzaram a fronteira da heliosfera e estão atualmente transitando pelo espaço interestelar. Em 2016, com dados dessas sondas, Opher e colaboradores [18] determinaram que a heliosfera deve ter a forma de um *croissant* cósmico (Figura 6).

4 Campo magnético e seu ciclo

O campo magnético global do Sol tem a forma de um dipolo, como o campo magnético da Terra e dos planetas gigantes do Sistema Solar. Este campo é gerado por um dínamo cujos ingredientes são a rotação e também a rotação diferencial do Sol [19]. O dínamo atua predominantemente na *tacoclina*, camada delgada localizada no interior solar, a 70% do raio solar, onde existem altos gradientes de velocidade do plasma. Os tubos de fluxo magnético produzidos no interior do Sol, flutuam até a superfície e ao atravessá-la for-

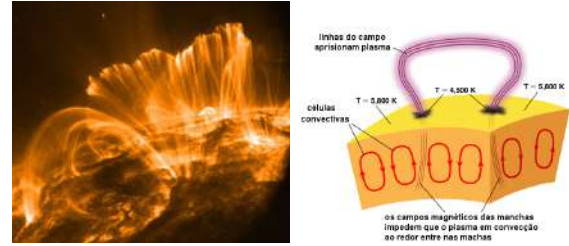


Figura 7: **Esquerda:** Imagem de arcos magnéticos coronais obtida pelo Transition Region And Coronal Explorer spacecraft (NASA/LMSAL) Fonte: <https://nso.edu/for-public/sun-science/coronal-loops/>. **Direita:** Representação de um tubo de flux magnético perfurando a fotosfera solar. As manchas solares se formam nos pés dos arcos. O bloco amarelo representa o interior solar, com a zona convectiva. Fonte: Ref. [1].

mam os arcos magnéticos observados na coroa solar em imagens de UV e raio X (Figura 7, painel à esquerda). Nos pés dos arcos, onde interceptam a fotosfera, formam-se as manchas solares, regiões escuras observadas em imagens do visível (Figura 7, painel à direita).

4.1 Manchas solares

Quando Galileu e seus contemporâneos apontaram as primeiras lunetas para os céus em 1611, notaram pequenas manchas escuras no Sol. Porém há evidências de observação de manchas no disco solar em meados do século IV a.C. por Teofrasto de Atenas, e relatos dos chineses já terem detectado manchas no Sol em 165 a.C. [20].

As manchas solares são regiões escuras e relativamente frias na superfície do Sol, a fotosfera. Embora tenham temperaturas entre 4500 a 5500 K [21], aparecem escuras em comparação com a fotosfera ao redor, cuja temperatura é de 5780 K. Manchas solares aparecem em regiões de intenso campos magnéticos (centenas a milhares de Gauss [21]), e são mais frias pois estes campos magnéticos inibem a convecção, o processo pelo qual o calor é transferido das camadas internas do Sol para sua superfície. Como resultado, a energia não consegue escapar tão eficientemente, e a temperatura na região da mancha diminui, tornando-a mais escura.

Manchas solares podem ocorrer aos pares ou em grupos e geralmente duram de algumas horas a poucos meses [5], com uma média de alguns dias. Existe uma relação do tempo de vida das manchas com seu tamanho, sendo que manchas

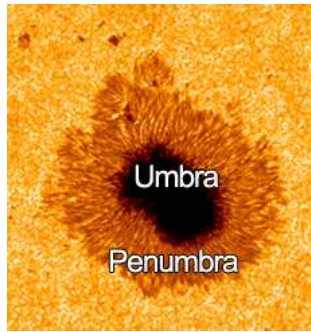


Figura 8: Imagem de uma mancha solar. A região central mais escura é denominada umbra, enquanto a região circundante mais clara é a penumbra. Fonte: https://global.jaxa.jp/article/special/astro/shimizu02_e.html.

maiores duram mais tempo. As manchas solares são compostas de duas regiões principais: a umbra e a penumbra (ver Figura 8), cada uma com características distintas.

A umbra é a parte central da mancha solar, sendo a região mais escura e fria da mancha, com temperaturas que variam entre 3.900 a 4.800 K [5], significativamente mais baixas do que a fotosfera ao redor. Na umbra, o campo magnético é mais intenso e concentrado e, portanto, mais eficiente em impedir a convecção e, conseqüentemente, o transporte de calor, contribuindo para a aparência mais escura da umbra. Também, este campo magnético é mais vertical em relação à superfície solar.

Já a penumbra é a região mais clara que circunda a umbra. Embora ainda mais fria que a fotosfera (geralmente entre 5.400 e 5.500 K [5]), a penumbra é mais quente do que a umbra. O campo magnético na penumbra é mais fraco e menos concentrado do que na umbra. Além disso, as linhas do campo magnético na penumbra são mais inclinadas, o que permite algum grau de convecção, resultando em temperaturas mais elevadas em comparação com a umbra. A penumbra tem uma aparência filamentar, com estrias que se estendem radialmente a partir da umbra (Figura 8).

As duas regiões juntas formam a estrutura completa de uma mancha solar. A presença de uma penumbra indica que a mancha solar é relativamente grande e madura. Manchas solares pequenas ou jovens podem não ter penumbra, consistindo apenas de uma umbra, e são denominadas de poros.

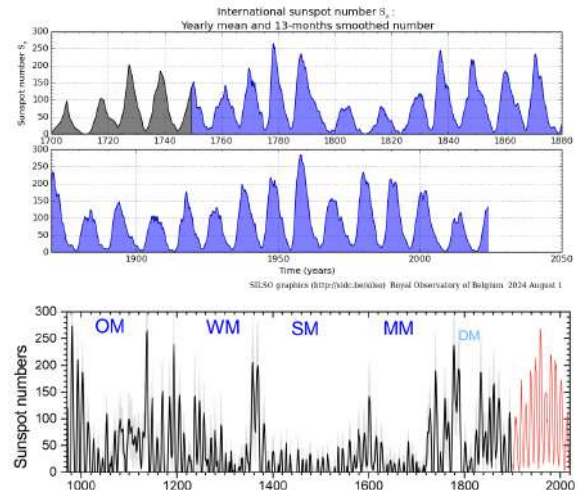


Figura 9: Superior: Número internacional de manchas (ISS) solares ao longo dos anos, de 1700 a 2024. Fonte: <https://sidc.be/SILSO/yearlyssnplot>. **Inferior:** Número anual de manchas solares reconstruídas a partir de ^{14}C (curva preta) desde 970 d.C.. A curva vermelha representa o número internacional de manchas (ISS) desde 1900. As siglas em azul denotam grandes mínimos de atividade solar: Mínimos de Oort (OM), Wolf (WM), Spörer (SM) e Maunder (MM) [20].

As manchas constituem os pés de arcos magnéticos que se estendem pela atmosfera alcançando a coroa (painel da direita da Figura 7). As regiões ativas localizadas acima das manchas são geralmente mais brilhantes do que o entorno, por serem regiões onde o plasma atrelado aos arcos magnéticos é mais quente. Estas regiões ativas podem ser vistas em imagens de rádio (painéis inferiores da Figura 2), ou no ultravioleta e em raio X (painel da direita da Figura 4). São denominadas de ativas pois é onde ocorrem os fenômenos como explosões solares e ejeções de massa coronal, que podem afetar o clima espacial e, por extensão, a Terra.

4.2 Ciclo de 11 anos

A quantidade de manchas solares varia com um período de aproximadamente 11 anos, conhecido como ciclo solar. Durante o máximo solar, o número de manchas é maior (podendo chegar a 100 – 200 manchas diárias), enquanto durante o mínimo solar, elas podem desaparecer quase que completamente (Figura 9, painel superior). Não apenas o número de manchas varia periodicamente em 11 anos, mas também a quantidade de explosões e ejeções de massa do Sol, assim como

o seu brilho total, conhecido como irradiância solar total [22]. Sabe-se que durante o máximo do ciclo, o brilho do Sol aumenta de 0,1%. Embora o número de manchas escuras aumente durante os máximos solares, a presença adicional de fáculas brilhantes compensa e supera a diminuição de brilho causada pelas manchas.

A descoberta do ciclo solar de 11 anos, também conhecido como ciclo de Schwabe, se deu no início do século XIX. A partir de 1826, o astrônomo amador alemão Samuel Heinrich Schwabe começou a observar sistematicamente o Sol [23]. Durante suas observações diárias, Schwabe percebeu que o número de manchas solares na superfície do Sol variava com o tempo. Durante cerca de 17 anos, Schwabe registrou meticulosamente o número de manchas solares visíveis a cada dia. Finalmente em 1843, Schwabe notou um padrão distinto, ao perceber que o número de manchas solares aumentava e diminuía regularmente ao longo do tempo, atingindo um máximo e um mínimo em intervalos de aproximadamente 10 anos. Em 1844, Schwabe publicou em alemão suas descobertas em um artigo intitulado “Observações Solares em 1843” [23], onde sugeriu que o ciclo completo de aumento e diminuição de manchas solares durava cerca de uma década. Hoje sabemos que o ciclo solar pode variar de 8 a 15 anos, com uma média de 11 anos [20].

Enquanto os fenômenos como manchas, explosões e ejeções apresentam uma periodicidade de 11 anos, aumentando e diminuindo sua ocorrência, o ciclo magnético global do Sol é de 22 anos. A cada 11 anos, o campo magnético solar reverte a sua polaridade, portanto, demora 22 anos para o campo magnético retornar à polaridade original.

4.3 Mínimo de Maunder e outros mínimos

A sorte de Galileu foi ter iniciado suas observações do Sol antes de 1640, pois as manchas desapareceram quase que por completo depois disto por uns 70 anos. Este período ficou conhecido como Mínimo de Maunder em homenagem ao seu descobridor [24]. O Mínimo de Maunder é um dos eventos mais conhecidos de redução na atividade solar, durante o qual o número de manchas solares e a atividade solar em geral diminuíram drasticamente. Esse período, que ocorreu entre



Figura 10: Quadro de pessoas patinando no rio Sena (Escola Flamenca).

aproximadamente 1645 e 1715, é o mais famoso de uma série de “mínimos solares” que ocorreram ao longo da história (painel inferior da Figura 9).

Utilizando registros de ^{14}C obtidos da análise de anéis de árvores do últimos 1000 anos, Eddy [25] identificou cinco grandes mínimos solares distintos (painel inferior da Figura 9). Estes mínimos de atividade solar são conhecidos como o Mínimo de Oort (1040-1080 d.C.), Mínimo de Wolf (1280-1350 d.C.), Mínimo de Spörer (1460-1550 d.C.), Mínimo de Maunder (1645-1715 d.C.) e Mínimo de Dalton (1790-1820 d.C.).

O astrônomo inglês Edward Walter Maunder e sua esposa Annie Maunder estudaram os registros históricos de manchas solares e identificaram que no final do século XVII, por uns 70 anos, o número de manchas solares observadas era extremamente baixo, cerca de 50 vezes menor do que o observado em outros períodos normais de atividade solar [24].

Curiosamente, este período coincidiu com a fase mais fria da chamada “Pequena Era do Gelo”, uma época de temperaturas mais baixas na Europa e América do Norte, quando rios como o Tâmsa em Londres e o Sena em Paris congelaram. As pinturas da época mostram pessoas patinando nestes rios (Figura 10). Este período também está associado a invernos excepcionalmente frios e colheitas fracassadas na Europa e América do Norte. Embora a relação direta entre atividade solar e clima terrestre seja complexa e envolva diversos fatores, acredita-se que a redução na atividade solar contribuiu para essas condições climáticas severas.

Além do Mínimo de Maunder, a história registra outros períodos de baixa atividade solar. O Mínimo de Spörer ocorreu entre 1450-1550, nomeado em homenagem ao astrônomo alemão Gustav Spörer, que, como Maunder, estudou os

registros históricos de manchas solares. Mais longo, o Mínimo de Spörer durou cerca de 100 anos e apresentou uma baixa atividade solar semelhante à do Mínimo de Maunder, com poucas manchas solares observadas.

Menos estudado, o Mínimo de Wolf é um período de 1280 a 1350, mas ainda assim significativo de baixa atividade solar. Assim como outros mínimos solares, este mínimo se caracterizou por uma redução no número de manchas solares. Esse período também está associado a condições climáticas mais frias, embora menos extremas do que a dos mínimos subsequentes.

Durante 1790-1830, ocorreu o Mínimo de Dalton quando o número de manchas solares diminuiu significativamente, embora não tão drasticamente quanto durante os Mínimos de Maunder ou Spörer. Este período durou cerca de 40 anos e não é considerado um grande mínimo [20], mas sim um mínimo do ciclo secular de Gleissberg (modulação da intensidade dos máximos do ciclo de 11 anos que tem uma periodicidade de ~ 90 anos).

A existência de grandes mínimos solares indica que o Sol pode passar por períodos prolongados de atividade reduzida, com possíveis implicações para o clima terrestre. A correlação entre mínimos solares e mudanças climáticas na Terra sugere que a atividade solar desempenha um papel, embora não totalmente compreendido, no sistema climático do nosso planeta.

5 Atividade solar

A atividade solar se manifesta de várias formas, desde manchas solares até eventos mais energéticos, como explosões solares e ejeções de massa coronal. Estes são fenômenos dinâmicos e complexos que ocorrem na superfície e na atmosfera do Sol. Toda esta atividade não apenas influencia o clima espacial, mas também têm o potencial de impactar significativamente uma sociedade cada vez mais dependente da tecnologia como a nossa.

5.1 Explosões

As explosões solares são súbitas e intensas liberações de energia da ordem de $10^{27} - 10^{32}$ erg que ocorrem na atmosfera solar, geralmente associadas às regiões ativas acima das manchas solares

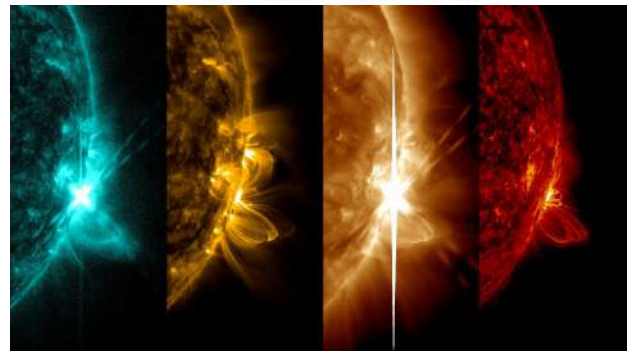
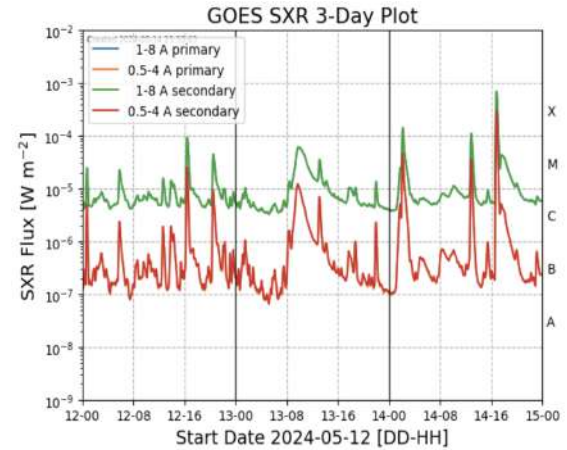


Figura 11: Superior: Emissão em raio X observada pelo satélite GOES para o período de 12 a 14 de maio de 2024. **Inferior:** Explosão solar classe X8.7 observada pelo AIA do satélite *Solar Dynamics Observatory* (SDO) da NASA às 16:46 UT do dia 14 de maio de 2024, em diferentes comprimentos de onda do EUV (da esquerda para direita: 131, 171, 193 e 304 Å).

(Figura 11, painel inferior). A energia liberada em uma explosão solar é maior que 10 milhões de vezes a energia liberada em uma explosão vulcânica. Por outro lado, esta energia é menos do que um décimo da energia emitida pelo Sol a cada segundo.

As explosões são classificadas de acordo com sua intensidade medida em raios X (1–8 Å) pelo *Geostationary Environmental Satellite System* (GOES). O sistema de classificação é logarítmico e utiliza as letras A, B, C, M e X, que correspondem a fluxos de pico das explosões de 10^{-8} W m $^{-2}$ para a classe A, menos energética, a 10^{-4} W m $^{-2}$ para as explosões X, as de mais alta energia. A Figura 11 (painel superior) mostra a curva de intensidade em raios X observada pelo GOES para o período de maio de 2024 quando ocorreram vários eventos X. Os raros eventos extremos ultrapassam intensidades de pico $\gtrsim 10^{-3}$ W m $^{-2}$ são denominados X10 e acima [26].

A fonte de energia das explosões são os processos de reconexão magnética que ocorrem acima dos arcos coronais, onde as linhas de campo magnético do Sol se reconfiguram. Durante a explosão, esta energia de origem magnética acelera partículas a velocidades relativísticas, aquece o plasma local e produz radiação eletromagnética em todo o espectro eletromagnético, desde raios X até ondas de rádio [27].

As explosões solares podem durar de alguns minutos a várias horas. A radiação emitida por uma explosão solar leva 8 minutos para atingir a Terra e as partículas aceleradas algumas poucas horas. A dose radiação X e UV de uma grande explosão pode ser fatal para um astronauta desprotegido, fora da estação espacial. Para a tripulação e passageiros de voos transpolares a dose chega a ser equivalente a várias chapas de raios X [28].

5.2 Ejeções de massa

As ejeções de massa coronal são eventos onde vastas quantidades de plasma (elétrons, prótons e íons), envoltas pelo campo magnético solar, são lançadas da coroa para o espaço interplanetário (Figura 12). Diferentemente das explosões solares, que são eventos de radiação e confinados na atmosfera solar, as ejeções de massa envolvem a expulsão física de material solar. Uma única ejeção de massa contém bilhões de toneladas (10^{12} kg) de plasma e atinge velocidades que variam de centenas de km/s a mais de 2.000 km/s, com valor médio de ~ 470 km/s [29].

Geralmente, as ejeções de massa coronal estão associadas à erupção de proeminências solares e/ou explosões. Porém não há uma relação direta entre as ejeções de massa e as explosões solares. Muitas ejeções são observadas sem a ocorrência de explosões, assim como a maioria das explosões tampouco está associada às ejeções de massa. Quando ejeções de massa coronal e explosões ocorrem juntas, o início da ejeção de massa parece preceder o das explosões em muitos casos. Em geral, as ejeções de massa mais rápidas e energéticas tendem a acontecer simultaneamente a explosões [30].

Ainda mais, as ejeções de massa coronal são bem mais energéticas do que a energia irradiada pela explosão propriamente dita. Entretanto, atualmente acredita-se que as ejeções de massa

coronal e as explosões fazem parte de um único “evento” de origem magnética e, portanto, é mais apropriado considerar um modelo unificado que explique ambos fenômenos [29]. De qualquer forma, a combinação dos efeitos de ambos tipos de atividade pode intensificar os impactos no clima espacial e, conseqüentemente, na Terra.

Às vezes uma quantidade de massa é arremessada em direção à Terra, nestes casos é chamada de ejeção de massa coronal do tipo halo. As ejeções halo têm um alto potencial de causar tempestades geomagnéticas quando interagem com a magnetosfera terrestre, principalmente se o seu campo magnético está voltado para o Sul (contrário à direção do campo magnético terrestre) [31]. Dependendo da velocidade com que são lançadas, as ejeções levam de um a quatro dias para alcançar a órbita da Terra.

5.3 Eventos extremos

O Evento Carrington, ocorrido em 1º de setembro de 1859, foi a primeira observação de uma explosão solar e menos de um dia depois aconteceu uma das maiores tempestades geomagnéticas já registradas [26]. Este evento é considerado um marco na história do clima espacial por ter causado uma série de efeitos na Terra, destacando a influência direta da atividade solar sobre o nosso planeta. O evento foi observado simultaneamente pelos astrônomos britânicos Carrington [32] e Hodgson [33]. Enquanto monitorava o Sol com um telescópio em seu observatório particular, Carrington notou uma explosão de luz intensa e brilhante na superfície solar. Estes tipos de eventos são atualmente conhecidos como explosão de luz branca.

Hoje sabe-se que esta observação coincidiu com a liberação de uma gigantesca ejeção de massa coronal em direção à Terra. Apenas cerca de 17,6 horas após a observação da explosão, a ejeção de massa coronal atingiu a magnetosfera terrestre, desencadeando uma poderosa tempestade geomagnética, a mais forte já registrada na história [26].

Os efeitos foram sentidos globalmente, com intensas auroras sendo visíveis em latitudes muito baixas, como no Havaí, no Caribe e na América Central. O Evento Carrington ocorreu durante a era do telégrafo, e os sistemas de telégrafo fo-

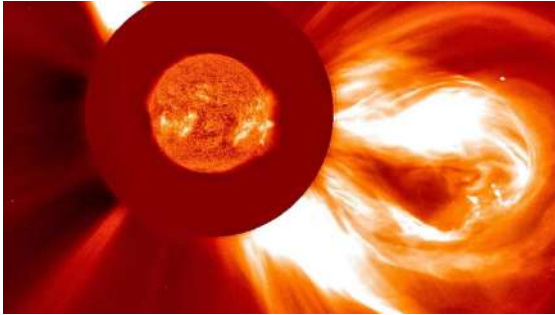


Figura 12: Uma ejeção de massa coronal observada pelo satélite *Solar and Heliospheric Observatory* (SOHO) da NASA/ESA em 2 de dezembro de 2003. Fonte: <https://soho.nascom.nasa.gov/gallery/images/20031202c2eit304.html>.

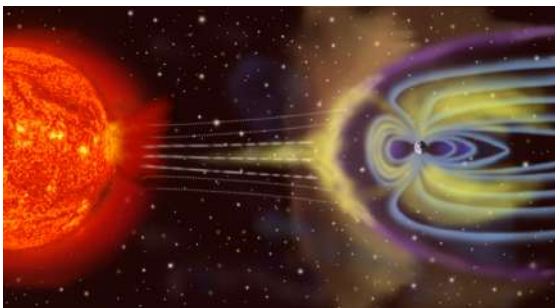


Figura 13: Concepção artística de uma ejeção de massa colidindo com a magnetosfera terrestre. <https://www.bas.ac.uk/project/extreme-sw/>.

ram severamente impactados. Correntes elétricas induzidas pela tempestade geomagnética fizeram com que muitos operadores de telégrafo recebessem choques elétricos, e os sistemas falharam ou operaram de forma errática. Em alguns casos, os telégrafos continuaram a funcionar mesmo depois de serem desconectados das baterias, alimentados apenas pela corrente geomagnética.

6 Clima espacial

Quando a radiação e as partículas produzidas pela atividade solar alcançam a Terra (Figura 13), estas podem causar: doses letais de radiação X para astronautas; alteração nas órbitas de satélites; tempestades geomagnéticas; variações na ionosfera que afetam as comunicações de longa distância; picos de correntes nas linhas de alta tensão; apagões; comportamento errático de instrumentos de navegação; mudanças na camada de ozônio; auroras espetaculares; e até influenciar o clima terrestre [1].

6.1 Tempestades geomagnéticas

As tempestades geomagnéticas são perturbações temporárias e intensas do campo magnético da Terra, causadas quando uma quantidade significativa de energia proveniente de ejeções de massa coronal ou do vento solar é transferida para a magnetosfera.

Quando uma ejeção de massa ou uma corrente de vento solar acelerado atinge a Terra, o choque de partículas carregadas pode causar compressão e distorção da magnetosfera. A reconexão magnética, um processo em que as linhas de campo magnético da ejeção ou do vento solar se conectam com as da Terra, permite a transferência de energia para a magnetosfera, intensificando as correntes elétricas e perturbando o campo magnético terrestre [31]. A chegada de uma ejeção de massa coronal geralmente produz tempestades mais intensas do que as originadas pela interação das correntes do vento solar (Seção 3).

As tempestades geomagnéticas são monitoradas por meio de índices de atividade como o Índice Kp² [34] e o Índice Dst³ (*Disturbance Storm Time*), que medem a intensidade da atividade geomagnética. Tempestades geomagnéticas intensas apresentam índices Dst < 100 nT e índice Kp \gtrsim 5.

6.2 Redes elétricas e apagões

Grandes tempestades geomagnéticas podem induzir correntes elétricas em redes de energia, causando sobrecargas e apagões, como o que ocorreu em Quebec, Canadá, em 1989. Em 10 de março ocorreu uma grande explosão (X4.5 na escala GOES) acompanhada por uma ejeção de massa coronal, que atingiu a Terra em 13 de março [35]. Quando a ejeção de massa colidiu com o campo magnético da Terra, induziu uma forte tempestade geomagnética causando rápidas flutuações nos campos geomagnéticos em todo o planeta, especialmente em altas latitudes, como a de Quebec.

Estas grandes flutuações nos campos magnéticos durante a tempestade geomagnética induziram correntes elétricas nas linhas de transmissão de energia de alta tensão. Por sua vez, as cor-

²<https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>

³<https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/>

rentes induzidas sobrecarregaram os transformadores da rede elétrica de Quebec, desencadeando o apagão.

Na madrugada de 13 de março de 1989, a rede elétrica de Quebec colapsou. A falha começou em um dos transformadores da Hidro-Québec [35], que foi danificado pelas correntes induzidas, e se espalhou rapidamente por todo o sistema, levando ao desligamento completo da rede. O apagão durou aproximadamente 9 horas, deixando cerca de 6 milhões de pessoas sem eletricidade durante o inverno rigoroso. O apagão afetou serviços públicos, transporte, comunicações, e causou interrupções generalizadas em toda a província de Quebec.

6.3 Instrumentos de navegação

Instrumentos de navegação que dependem de medições precisas do campo magnético da Terra, como bússolas e alguns sistemas de navegação baseados em magnetômetro, podem ser afetados por alterações temporárias e irregulares no campo geomagnético. Estes instrumentos podem apresentar leituras incorretas ou erráticas devido às flutuações do campo magnético durante as tempestades geomagnéticas, induzindo erros na determinação da sua direção e localização.

Tempestades geomagnéticas também podem afetar a operação de satélites, que são usados para navegação por satélite (como o GPS [26]). As partículas carregadas podem danificar os componentes eletrônicos dos satélites além de interferirem nos sinais transmitidos e recebidos, afetando a precisão dos dados de navegação, devido à interferência e distorções causadas pelas tempestades geomagnéticas. As correções necessárias para compensar estes efeitos podem ser mais difíceis durante eventos de intensa atividade solar. Estes problemas são perigosos para decolagem ou aterrissagem automáticas de aviões.

6.4 Satélites artificiais e comunicação

A atividade solar pode danificar satélites, ao induzir correntes elétricas que podem causar curto-circuitos além de danificar painéis solares pela colisão de partículas energéticas. Também interfere na propagação dos sinais dos satélites de comunicação devido às alterações do meio interplanetário próximo.

Durante uma tempestade geomagnética, a energia depositada na atmosfera superior, especialmente na termosfera, aquece essa região, causando sua expansão. Nestes casos, a termosfera pode expandir centenas de quilômetros, aumentando a densidade do ar nas altitudes onde normalmente seria muito tênue. Satélites em órbitas baixas (LEO, *Low Earth Orbit*) experimentam um leve arrasto devido à presença de partículas atmosféricas, mesmo em condições normais. Esse arrasto é geralmente muito pequeno, mas durante a expansão da termosfera, a densidade do ar nessas altitudes aumenta significativamente.

O aumento do arrasto atmosférico provoca um rápido decaimento orbital dos satélites, fazendo com que percam altitude mais rapidamente do que o previsto. Se o arrasto for grande o suficiente, os satélites podem não conseguir manter sua órbita e acabar reentrando na atmosfera, onde são destruídos.

Em fevereiro de 2022, a SpaceX lançou 49 satélites Starlink em uma órbita inicial baixa, como parte do procedimento normal antes de movê-los para sua órbita operacional mais alta. No entanto, logo após o lançamento, uma tempestade geomagnética causou uma expansão da termosfera, aumentando o arrasto atmosférico. Devido ao aumento inesperado do arrasto, os satélites da SpaceX recém-lançados não conseguiram elevar sua órbita conforme planejado. Como resultado, mais de 40 dos 49 satélites lançados acabaram reentrando na atmosfera e foram destruídos [36]. Acredita-se que neste dia houve o efeito amplificado de duas ejeções de massa, quando uma mais rápida alcançou outra mais lenta que já estava a caminho da Terra.

6.5 Ionosfera

O fluxo solar tem um impacto significativo na ionosfera terrestre, uma camada da atmosfera que fica entre aproximadamente 60 km e 2.000 km de altitude [37]. Apesar de ser uma fração pequena da nossa atmosfera, a ionosfera é crucial para as comunicações de longa distância, pois age como um guia de onda, especialmente para as ondas de rádio de baixa frequência (< 300 MHz) que são refletidas nessa camada.

Durante períodos de alta atividade solar, a radiação ultravioleta extrema (EUV) e os raios X

provenientes do Sol aumentam a ionização na ionosfera [38]. Isto ocorre porque a radiação UV e X têm energia suficiente para remover elétrons dos átomos na atmosfera superior, criando mais íons e elétrons livres. O aumento da ionização infla a ionosfera abaixando seu limite inferior e, portanto, alterando a altura de reflexão das ondas de rádio, reduzindo a eficácia das comunicações. Em algumas regiões, as ondas de rádio podem ser desviadas, atenuadas ou até bloqueadas completamente, dificultando as comunicações. Tempestades intensas podem até causar interrupções de comunicações em certas frequências.

A ionosfera também afeta diretamente a precisão dos sinais de GPS, que passam por essa camada ao viajarem do satélite ao receptor na Terra. A atividade solar intensa pode causar atrasos e erros de posicionamento. Esses erros podem ser críticos para sistemas de navegação e sincronização de tempo, afetando tanto operações civis quanto militares.

6.6 Auroras

As auroras, fenômenos luminosos fascinantes, são vistas no céu noturno como um brilho difuso ou como “cortinas” coloridas que se estendem aproximadamente na direção leste-oeste (Figura 14). As auroras boreais (no hemisfério norte) e austrais (no hemisfério sul) ocorrem quando partículas carregadas das ejeções de massa ou do vento solar interagem com o campo magnético da Terra e conseguem penetrar na nossa atmosfera acima de 80 km. Devido à configuração do campo geomagnético, a entrada destas partículas se dá mais facilmente pelas regiões polares, pois o campo magnético as canaliza para essas áreas.

Ao atingir a atmosfera, estas partículas, principalmente elétrons e prótons, colidem com os átomos e moléculas dos gases atmosféricos. As colisões transferem energia das partículas solares para os gases atmosféricos ionizando ou excitando os átomos e moléculas para um estado de energia mais alto. Quando esses átomos e moléculas se recombinam com um elétron ou voltam ao seu estado normal, a energia é liberada na forma de luz (fóton), que é o que observamos como auroras.

A coloração das auroras é resultado da interação dessas partículas com diferentes gases presen-



Figura 14: Imagem de aurora boreal salientando suas várias cores. Fonte: extraído de BGR.

tes na atmosfera terrestre. A cor específica das auroras depende do tipo de átomo ou molécula que está sendo excitado e da altitude em que essa excitação ocorre. O verde (comprimento de onda de cerca de 557,7 nm) é a cor mais comum das auroras e é produzido por átomos de oxigênio (Figura 14). Essa cor é emitida a altitudes entre 100 e 300 km, com pico em 110 km [39]. Abaixo de 100 km, há brusca diminuição da concentração de oxigênio atômico, causando um término abrupto das bordas inferiores das “cortinas”.

O vermelho também é emitido por átomos de oxigênio ($\lambda = 630$ nm), mas em altitudes mais altas, acima de 150 km com pico em 250 km, onde a densidade é muito baixa [39]. Já as auroras azuis ($\lambda = 427,8$ nm) e violetas são bem mais raras e são produzidas por moléculas de nitrogênio, emitindo em altitudes abaixo de 100 km [39]. A cor rosa resulta de uma combinação das emissões de nitrogênio e oxigênio. Geralmente ocorre em altitudes médias, onde ambas as moléculas podem ser excitadas.

A intensidade das auroras também depende da energia e da quantidade de partículas solares atingindo a Terra. Tempestades solares intensas produzem auroras mais brilhantes e com uma gama maior de cores. Um dos efeitos mais visíveis das tempestades geomagnéticas é a intensificação das auroras, que podem ser vistas em latitudes mais baixas do que o normal [26].

6.7 Clima terrestre

A relação entre o clima terrestre e a atividade solar é bastante complexa e às vezes controversa. Além da relação entre o período do Mínimo de Maunder (1645-1715) [24, 25], uma fase de baixa atividade solar, que coincidiu com um período de

resfriamento global conhecido como Pequena Era do Gelo [40], pode existir uma influência do ciclo de 11 anos.

A radiação solar que atinge a Terra varia 0,1% ao longo do ciclo de atividade solar de 11 anos [22]. Durante períodos de alta atividade solar, como o máximo solar, o Sol emite uma quantidade ligeiramente maior de radiação, o que pode ter um efeito sutil sobre o clima da Terra, podendo acarretar um ligeiro aumento nas temperaturas globais. No entanto, esse efeito é pequeno em comparação com os fatores internos do clima, como as concentrações de gases de efeito estufa.

A radiação UV do Sol também varia com a atividade solar. Mudanças na radiação UV, por exemplo, durante explosões intensas, podem afetar a temperatura da estratosfera e, por conseguinte, influenciar a dinâmica da circulação atmosférica. Também, estas variações na atividade solar podem afetar a concentração de ozônio na estratosfera. Alterações na camada de ozônio influenciam a distribuição da radiação solar na superfície da Terra e, por conseguinte, impactam o clima. A atividade solar pode ainda influenciar padrões de circulação atmosférica e sistemas meteorológicos, embora essas interações sejam complexas e muitas vezes difíceis de quantificar.

Entretanto, a atividade solar é apenas um dos muitos fatores que influenciam o clima da Terra. Gases de efeito estufa, como dióxido de carbono e metano, têm um impacto muito mais significativo e direto sobre o clima, especialmente no contexto das mudanças climáticas atuais.

7 Considerações finais

Viver em torno de uma estrela ativa pode ser problemático para uma sociedade tão dependente de tecnologia como a nossa. Portanto, as pesquisas em Física Solar visam um melhor entendimento das causas da atividade solar. A partir deste conhecimento, espera-se poder prever como e quando eventos extremos ocorrerão. Nestes casos, medidas preventivas como o desligamento de satélites, por exemplo, podem ser tomadas a fim de diminuir o impacto destes eventos.

O Evento Carrington foi um dos primeiros a demonstrar claramente a conexão entre atividades solares e seus efeitos na Terra, destacando a

importância de monitoramento do clima espacial. Também serviu como um alerta para os potenciais danos que eventos solares extremos podem causar em tecnologias.

Se um evento similar ao de Carrington ocorresse hoje, poderia ter consequências devastadoras, devido à nossa dependência de tecnologia eletrônica e satélites. As redes de energia, comunicações por satélite, GPS e outras infraestruturas críticas estariam em risco. Como resultado, a comunidade científica e as agências governamentais têm investido em monitoramento e preparação para mitigar os efeitos de futuras tempestades solares intensas.

Monitorar a atividade solar é crucial para prever seus impactos no espaço próximo à Terra. As explosões solares e ejeções de massa são detectadas e monitoradas por uma variedade de satélites e telescópios espaciais, como o GOES, SOHO, TRACE, Wind, ACE, STEREO, e Solar Dynamics Observatory (SDO). Estas observações fornecem alertas antecipados de tempestades solares, permitindo que medidas de mitigação sejam tomadas para proteger satélites, astronautas, e infraestruturas sensíveis na Terra.

No Brasil, o EMBRACE⁴ (Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial) é um programa de monitoramento do clima espacial. Criado em agosto de 2007 pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem a missão de monitorar o ambiente do espaço Sol-Terra, a magnetosfera, a atmosfera superior e os efeitos de correntes induzidas no solo para prever possíveis influências nas atividades tecnológicas e econômicas.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os meus colaboradores que ao longo dos anos contribuíram para as minhas pesquisas sobre o Sol. Principalmente, sou grata à parceria de meus alunos de graduação e pós-graduação.

Sobre a autora

Adriana Valio (avalio@craam.mackenzie.br) é

⁴<https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>

especialista em atividade solar, principalmente em explosões e manchas. Escreveu o livro “Nossa Estrela: o Sol” [1] para professores e alunos do ensino médio e alunos de graduação. É pesquisadora do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica Mackenzie. Entre 2013 e 2023 foi coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Ciências e Aplicações Geoespaciais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Referências

- [1] A. V. R. Silva, *Nossa Estrela: o Sol* (Livraria da Física, 2006), 1 ed.
- [2] S. O. Kepler e M. F. O. Saraiva, *Astronomia & Astrofísica* (Livraria da Física, 2014), 3 ed. Disponível em <http://astro.if.ufrgs.br/livro.pdf>.
- [3] M. Stix, *The Sun. An Introduction* (1991).
- [4] J. P. Rozelot, *Solar photosphere* (Springer Netherlands, Dordrecht, 1997), 754–756.
- [5] S. K. Solanki, *Sunspots: An overview*, *The Astronomy and Astrophysics Review* **11**(2-3), 153 (2003).
- [6] J. E. Vernazza, E. H. Avrett e R. Loeser, *Structure of the solar chromosphere. III. Models of the EUV brightness components of the quiet sun.*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **45**, 635 (1981).
- [7] C. L. Selhorst, A. V. R. Silva e J. E. R. Costa, *Solar atmospheric model with spicules applied to radio observation*, *Astronomy & Astrophysics* **433**(1), 365 (2005).
- [8] P. Schwartz et al., *2D non-LTE modelling of a filament observed in the H α line with the DST/IBIS spectropolarimeter*, *Astronomy & Astrophysics* **631**, A146 (2019). [ArXiv:1910.03607](https://arxiv.org/abs/1910.03607).
- [9] S. R. Cranmer e A. R. Winebarger, *The Properties of the Solar Corona and Its Connection to the Solar Wind*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **57**, 157 (2019). [ArXiv:1811.00461](https://arxiv.org/abs/1811.00461).
- [10] J. A. Klimchuk, *On Solving the Coronal Heating Problem*, *Solar Physics* **234**(1), 41 (2006). [ArXiv:astro-ph/0511841](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0511841).
- [11] A. A. Vidotto, *The evolution of the solar wind*, *Living Reviews in Solar Physics* **18**(1), 3 (2021). [ArXiv:2103.15748](https://arxiv.org/abs/2103.15748).
- [12] E. Parker, *Extension of the Solar Corona into Interplanetary Space*, *Journal of Geophysical Research* **64**(11), 1675 (1959).
- [13] R. G. Marsden, *The heliosphere after Ulysses*, *Astrophysics and Space Science* **277**, 337 (2001).
- [14] J. L. Phillips et al., *Ulysses Solar Wind Plasma Observations at High Southerly Latitudes*, *Science* **268**(5213), 1030 (1995).
- [15] I. G. Richardson, *Solar wind stream interaction regions throughout the heliosphere*, *Living Reviews in Solar Physics* **15**(1), 1 (2018).
- [16] S. D. Bale et al., *The FIELDs Instrument Suite for Solar Probe Plus. Measuring the Coronal Plasma and Magnetic Field, Plasma Waves and Turbulence, and Radio Signatures of Solar Transients*, *Space Science Reviews* **204**(1-4), 49 (2016).
- [17] F. S. Mozer et al., *Switchbacks in the Solar Magnetic Field: Their Evolution, Their Content, and Their Effects on the Plasma*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **246**(2), 68 (2020).
- [18] M. Opher et al., *Magnetized jets driven by the Sun: The structure of the heliosphere revisited—Updates*, *Physics of Plasmas* **23**(5), 056501 (2016).
- [19] P. Charbonneau, *Dynamo models of the solar cycle*, *Living Reviews in Solar Physics* **17**(1), 4 (2020).
- [20] I. G. Usoskin, *A history of solar activity over millennia*, *Living Reviews in Solar Physics* **20**(1), 2 (2023).
- [21] A. Valio et al., *Correlations of Sunspot Physical Characteristics during Solar Cycle 23*, *Solar Physics* **295**(9), 120 (2020).

- [22] C. Fröhlich, *Total Solar Irradiance: What Have We Learned from the Last Three Cycles and the Recent Minimum?*, [Space Science Reviews](#) **176**(1-4), 237 (2013).
- [23] H. Schwabe, *Die Sonne. Von Herrn Hofrath Schwabe*, [Astronomische Nachrichten](#) **20**(17), 283 (1843).
- [24] E. W. Maunder, *The Prolonged Sunspot Minimum, 1645-1715*, [Journal of the British Astronomical Association](#) **32**, 140 (1922).
- [25] J. A. Eddy, *The Maunder Minimum*, [Science](#) **192**(4245), 1189 (1976).
- [26] E. W. Cliver et al., *Extreme solar events*, [Living Reviews in Solar Physics](#) **19**(1), 2 (2022). [ArXiv:2205.09265](#).
- [27] A. O. Benz, *Flare observations*, [Living Reviews in Solar Physics](#) **14**(1), 2 (2017).
- [28] D. S. Smith e J. M. Scalo, *Risks due to X-ray flares during astronaut extravehicular activity*, [Space Weather](#) **5**(6), S06004 (2007). [ArXiv:astro-ph/0701314](#).
- [29] D. F. Webb e T. A. Howard, *Coronal Mass Ejections: Observations*, [Living Reviews in Solar Physics](#) **9**(1), 3 (2012).
- [30] N. Gopalswamy, S. Yashiro e S. Akiyama, *Geoeffectiveness of halo coronal mass ejections*, [Journal of Geophysical Research \(Space Physics\)](#) **112**(A6), A06112 (2007).
- [31] W. D. Gonzalez e B. T. Tsurutani, *Criteria of interplanetary parameters causing intense magnetic storms ($D_{st} < -100$ nT)*, [Planetary and Space Science](#) **35**(9), 1101 (1987).
- [32] R. C. Carrington, *Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **20**, 13 (1859).
- [33] R. Hodgson, *On a curious Appearance seen in the Sun*, [Monthly Notices of the Royal Astronomical Society](#) **20**, 15 (1859).
- [34] J. Bartels, N. H. Heck e H. F. Johnston, *The three-hour-range index measuring geomagnetic activity*, [Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity](#) **44**(4), 411 (1939).
- [35] D. H. Boteler, *A 21st Century View of the March 1989 Magnetic Storm*, [Space Weather](#) **17**(10), 1427 (2019).
- [36] T. Dang et al., *Unveiling the Space Weather During the Starlink Satellites Destruction Event on 4 February 2022*, [Space Weather](#) **20**(8), e2022SW003152 (2022).
- [37] D. Bilitza et al., *The International Reference Ionosphere Model: A Review and Description of an Ionospheric Benchmark*, [Reviews of Geophysics](#) **60**(4), e2022RG000792 (2022).
- [38] L. R. Cander, *Ionospheric research and space weather services*, [Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics](#) **70**(15), 1870 (2008).
- [39] S. R. N. Gupta, *Review of Aurora borealis spectacular manifestations of solar wind and atmosphere*, [International Research Journal of Science & Engineering](#) **80**(1), 5 (2020).
- [40] W. K. Schmutz, *Changes in the Total Solar Irradiance and climatic effects*, [Journal of Space Weather and Space Climate](#) **11**, 40 (2021).

OASI: um observatório dedicado aos pequenos corpos do Sistema Solar

Teresinha Rodrigues

Observatório Nacional

Resumo

Neste texto serão abordados as motivações e o processos de instalação e operação no Brasil de um observatório astronômico dedicado ao estudo de propriedades físicas de pequenos corpos do Sistema Solar. Da idealização da proposta, em 2005, até o pleno funcionamento do observatório, muitos desafios até então insuspeitados passaram a fazer parte das variáveis do projeto, extrapolando os limites técnico-científicos. Os resultados também vêm excedendo o esperado: além da boa produção acadêmica, em 13 anos de operação, o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) mantém importantes colaborações com instituições de ensino e pesquisa da região Nordeste, buscando incluir a sociedade nos processos de pensar e fazer ciência.

Abstract

This paper addresses the motivation, installation process, and operation of an astronomical observatory in Brazil dedicated to studying the physical processes of small bodies within the Solar System. From the proposal idealization in 2005 to the observatory's full functioning, several unsuspected challenges became part of the project's variables, extrapolating the technical-scientific limits. The results have also been exceeding expectations: in 13 years of operation, the Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI) not only counts with good academic production but also maintains important collaborations with education and research institutions of the Brazilian Northeast region, seeking to include the society in the processes of thinking and doing science.

Palavras-chave: Sistema Solar, astronomia observacional, Observatório Nacional (Brasil)

Keywords: Solar System, observational astronomy, Observatório Nacional (Brazil)

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45206](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45206)

1 Introdução

Asteroides e cometas são classificados como pequenos corpos do Sistema Solar. São objetos que, de acordo com a Resolução B5¹ da União Astronômica Internacional (IAU), de 2006, não se enquadram nas categorias de planetas ou de planetas anões.

Apesar do grande número desses pequenos corpos hoje conhecidos, ainda persistem muitas questões científicas em aberto, incluindo suas propriedades físicas, as regiões de onde se originam

e o tamanho das populações, entre outras.

Com a instalação de um observatório dedicado ao estudo de pequenos corpos, o Observatório Nacional (ON) se propôs a contribuir para aumentar o conhecimento sobre esses objetos e integrar o Brasil aos programas internacionais de busca e seguimento de asteroides e cometas em risco de colisão com a Terra. Esses programas, concentrados no Hemisfério Norte, terminam por deixar boa parte da esfera celeste sem monitoramento, fazendo com que a maioria dos objetos descobertos seja perdida por não haver um seguimento que permita boa determinação da órbita.

Criado em 1827, e atualmente integrando o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, o ON têm sido responsável pela implantação de grande parte da infraestrutura física de pesquisa nas áreas de astronomia, geofísica e metrologia em tempo e frequência no Brasil. São exemplos: a

¹A Resolução B5 da XXVI Assembleia Geral da IAU, realizada em 2006 em Praga, República Tcheca, classificou os corpos do nosso Sistema Solar em três categorias: planetas, planetas anões e pequenos corpos. Por esta mesma Resolução, Plutão foi definido como um planeta anão. Disponível em: https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf. Acesso em: 15 jun 2024.

criação das bases para instalação do Observatório Astrofísico Brasileiro (OAB), em 1980, no Pico dos Dias (Brazópolis, MG);² as redes geomagnética, gravimétrica e sismológica de abrangência nacional, e o constante investimento em padrões atômicos para pesquisa e geração da Hora Legal Brasileira.

A proposta de implantação de um observatório dedicado ao estudo de propriedades físicas de asteroides e cometas no ON partiu do Grupo de Ciências Planetárias, que vinha se consolidando com a realização de trabalhos de projeção internacional. O mais importante deles, um mapeamento³ de composições de 820 asteroides é ainda o segundo em tamanho atualmente disponível no mundo. Realizado entre 1996 e 2001, demandou um programa de observações que foi realizado em telescópios de diversos países, nas poucas noites obtidas por meio de projetos submetidos aos comitês gerenciadores desses observatórios.

Era, então, chegada a hora de prover uma infraestrutura própria para essa linha de pesquisa no ON. A oportunidade surgiu na Chamada Pública MCT/Finep/CT-INFRA-PROINFRA 01/2004, que ocorreu no ano de 2005.

2 O projeto IMPACTON

O objetivo da proposta submetida à Finep era instalar um telescópio robótico em solo brasileiro dedicado ao estudo das propriedades físicas de asteroides e cometas em órbitas próximas da Terra.

Os asteroides podem ser divididos em três grupos principais, de acordo com sua localização no Sistema Solar: os integrantes do “Cinturão Principal”, na região entre Marte e Júpiter; os “Troianos”, que acompanham a órbita de Júpiter; e aqueles cruzadores das órbitas dos planetas interiores, conhecidos pela sigla NEA (Near Earth Asteroid). Por sua vez, os cometas são objetos originados nas regiões mais distantes e frias do Sistema Solar e que, com suas órbitas de grande excentricidade, podem alcançar regiões próximas ao Sol, muitas vezes perdendo seu material volátil.

²O OAB deu origem ao Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA), em 1985.

³D. Lazzaro, C. Angeli, J.M. Carvano, T. Mothé-Diniz, R. Duffard, M. Florczak, *S³OS²: the visible spectroscopic survey of 820 asteroids*, *Icarus*, 172(1), 179 (2004).

A denominação NEO (Near Earth Object) reúne os objetos com periélio menor ou igual a 1,3 UA (unidades astronômicas), ou seja, asteroides e cometas cujo maior acercamento do Sol chega a uma distância próxima à da Terra ao Sol, cerca de 150 milhões de quilômetros.

Os NEOs não estão necessariamente muito próximos da Terra, mas podem se acercar devido a diversos fatores dinâmicos. Será considerado um objeto potencialmente perigoso (PHO, da sigla Potentially Hazardous Object) se a distância mínima de sua interseção orbital em relação à Terra for inferior a 0,05 UA e a estimativa de seu diâmetro for superior a 140 metros.

A escolha dos NEOs como principal alvo de pesquisa do projeto IMPACTON se deveu à relevância que uma forte base estatística, formada pelo conhecimento das propriedades físicas do maior número possível desses corpos, tem para a compreensão da origem, da distribuição de tamanhos e composições e dos mecanismos de transporte dessa população para as cercanias da Terra.

Além dos objetivos científicos, o projeto IMPACTON foi formulado para montar toda a infraestrutura física de pesquisa em solo brasileiro, ampliando o potencial de formação de novos pesquisadores. A proposta de operação remota e totalmente automatizada do telescópio se justificou por reduzir significativamente tanto o custo de construção quanto as despesas operacionais do observatório.

3 A implantação do projeto IMPACTON

O orçamento do projeto IMPACTON contemplava a compra de apenas um item: o telescópio, no valor de 950 mil reais. Os recursos necessários para aquisição dos demais instrumentos e para fazer frente aos custos de instalação e operação do observatório tiveram que ser buscados em outras fontes.

Tanto o telescópio quanto a cúpula astronômica são equipamentos que pedem tempo de construção após a encomenda. O tempo que seria ocupado para a definição do sítio e realização das obras civis do observatório.

Começava um processo que, em todas as etapas, extrapolou a simples escolha e aquisição de um telescópio robótico. Um desafio que exigiu



Figura 1: Montagem da Cúpula.

o desdobramento da equipe em várias frentes de trabalho e a parceria com diversas instituições

A seguir, são destacados dois aspectos cruciais da implantação do projeto: a instrumentação e a definição do sítio.

3.1 Instrumentação

A escolha e a compra dos equipamentos que melhor atendam aos objetivos científicos de um projeto e, ao mesmo tempo, às limitações orçamentárias é, sem dúvida, um dos seus pontos críticos.

Para a compra do telescópio, foi realizada uma tomada de preços internacional e selecionada a empresa Astro Optik Philipp Keller, sediada na Alemanha. A proposta envolvia três etapas: a de encomenda do espelho de 1,0 metro de diâmetro a um fabricante russo; a montagem mecânica e, finalmente, a instalação e automação do instrumento.

Inicialmente foi acordada a construção do telescópio com montagem equatorial, mas a indefinição do local de instalação levou a uma importante modificação no projeto: a substituição pela montagem alto-azimutal. A diferença entre essas montagens é que, na primeira, o eixo do instrumento é fixado em um ângulo que é a latitude do local. Já a montagem alto-azimutal, com o eixo apontado para o zênite, independe da latitude local.

À época da encomenda do telescópio já havia sido realizada uma pesquisa prévia de sítio com base em informações meteorológicas.⁴ Es-

⁴Foram analisados dados e estudos climáticos do Banco de Dados Ambientais do ON (Banpetro), do Centro de

tava claro que o local mais apropriado para instalação do observatório seria a região semiárida do Brasil, mas muitos fatores ainda deveriam ser ponderados até a definição do lugar exato.

Para a aquisição da cúpula que abrigaria o telescópio, foram considerados os seguintes requisitos: material com baixa condutividade térmica para evitar aquecimento excessivo do ambiente durante o período diurno; boa resistência e impermeabilização para as intempéries atmosféricas; tamanho suficiente para o porte do telescópio e, por fim, possibilidade de completa automação.

Da avaliação dos produtos oferecidos por empresas nacionais e internacionais, foi escolhida uma cúpula de 6,7 m de diâmetro e 5,5 m de altura, construída em fibra de vidro e dotada de painéis solares para carga de baterias, fabricada pela empresa Sirius Observatores, na Austrália (Figura 1).

Completando a instrumentação básica, foi adquirida uma câmera CCD⁵ com resfriamento termoelétrico (sistema Peltier). Devido ao propósito de operação remota do telescópio, esse sistema se mostrou mais adequado por prescindir do resfriamento com nitrogênio líquido requerido pelas câmeras convencionais a cada noite de observação (Figura 2).

A primeira câmera CCD, com 1024×1024 *pixels*, permitia resolução no plano focal de $0.275''$ e campo no céu de $6' \times 6'$. Nos anos seguintes foram adquiridas outras câmeras com 2048×2048 *pixels* e campo de $12' \times 12'$, permitindo melhor performance nas observações astronômicas.

O observatório ainda foi equipado com uma câmera *all-sky*, um sensor de chuva e uma estação meteorológica, além do fundamental sistema computacional.

3.2 A escolha do sítio

Idealmente, o melhor local para instalação de um observatório astronômico resulta da combina-

Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPETC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

⁵O CCD (Charge-Coupled Device) é constituído por uma matriz de *pixels* que registra a quantidade de luz que recebe e a transforma em corrente elétrica por efeito fotoelétrico. Na astronomia, as câmeras CCD são capazes de converter sinais luminosos extremamente fracos em sinais digitais, que podem ser reunidos e arquivados em computadores para análise posterior.

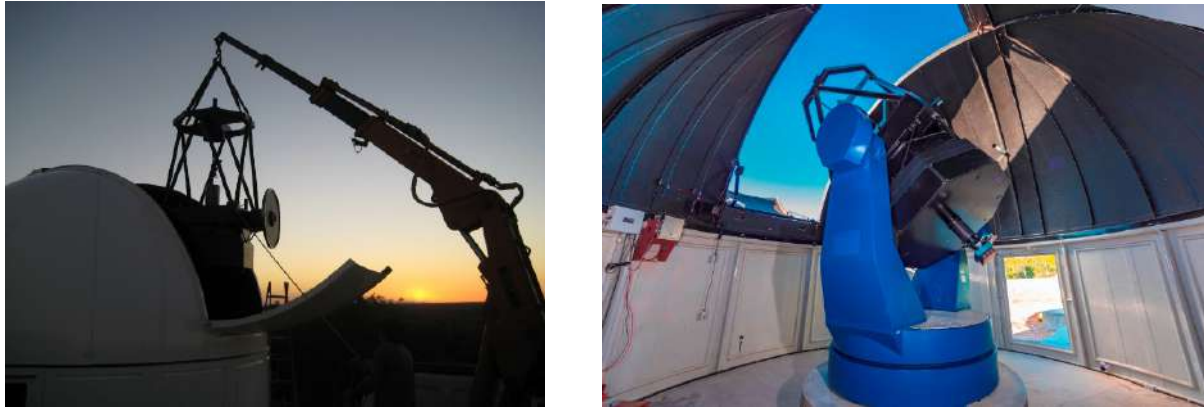


Figura 2: Esquerda: montagem do telescópio. Direita: telescópio de espelho principal de 1,0 m de diâmetro.

ção de alta altitude, clima seco, baixa temperatura noturna e ausência de iluminação artificial. No entanto, a busca desse local ideal com baixa turbulência atmosférica e céu escuro implica em maiores investimentos de infraestrutura de acesso e operação. Completando o dilema, manter-se próximo às facilidades do centro urbano, com acesso a estradas e internet, significa limitar as condições de observação astronômica.

Dessa forma, o melhor sítio é aquele que tanto atende aos critérios técnicos do projeto, como também aos demais parâmetros de viabilidade – alguns não necessariamente astronômicos – como parcerias locais e logística de acesso e operação.

Entre os principais fatores técnicos que influenciam a escolha de um sítio astronômico estão aqueles relacionados com as condições meteorológicas gerais e as contribuições locais ao *seeing*. O termo *seeing* é utilizado para descrever a variação aleatória na direção da luz que chega ao espelho do telescópio, causada por movimentos turbulentos da atmosfera terrestre. Dessa forma, vários fatores podem influenciar a qualidade da imagem astronômica, tais como o perfil térmico na região, a formação de nuvens cirrus e neblina, a velocidade e a direção dos ventos, e a presença de poluição atmosférica.

A análise das séries históricas de índices pluviométricos e de dados climatológicos em geral indicou o Semiárido brasileiro como a região com os mais baixos índices de umidade relativa, de nebulosidade e de evaporação. Adicionalmente, com baixa densidade demográfica e com cidades ainda bastante afastadas umas das outras, a região pouco contribui para o “brilho do céu” causado pela iluminação urbana. É fato que a polui-

ção luminosa interfere fortemente na observação astronômica e, particularmente, na determinação das propriedades físicas de objetos pequenos e de baixo brilho.

Definida a melhor região, no que diz respeito aos fatores técnicos, ao longo do ano de 2006 foram realizados estudos preliminares e visitas a algumas localidades onde, potencialmente, as facilidades logísticas pudessem ser supridas por parcerias com instituições públicas de ensino e pesquisa. No entanto, os campi universitários, escolas técnicas rurais e as estações agropecuárias consideradas não atenderam aos critérios básicos de baixos índices pluviométricos e pouca iluminação artificial no entorno.

A oportunidade de instalação do telescópio em Itacuruba, no Sertão pernambucano, surgiu de um convite realizado pelo prefeito da cidade, que soubera do projeto IMPACTON através da imprensa. Já existia no município uma iniciativa de astronomia amadora em parceria com o Cube Estudantil de Astronomia (CEA), sediado em Recife, e a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (Chesf) e que envolvia a construção de dois observatórios: um para as atividades do clube de astronomia e outro para ações de turismo astronômico a serem promovidas pelo município. Este projeto atendia ao compromisso da Chesf com o desenvolvimento local, visto que Itacuruba foi uma das cidades transplantadas para a formação do lago de Itaparica e a construção da usina hidrelétrica Luiz Gonzaga.

As obras dos prédios desses observatórios tinham sido iniciadas em 2001. Mas, com problemas nos projetos de engenharia e na proposta de gestão dos empreendimentos, as construções fo-



Figura 3: Instalações do OASI.

ram paralisadas logo em seguida.

Em conjunto com o oferecimento de apoio logístico do município ao projeto IMPACTON, também foi apresentada a proposta de aproveitamento de uma das construções abandonadas. O sítio era interessante: extremamente seco, afastado cerca de 8 quilômetros do pequeno núcleo urbano e contando com a facilidade de uma estrada de acesso. O prédio inacabado, porém, mostrou-se inadequado. Além dos vícios de construção, que levaram à completa ruína da estrutura, a localização no ponto culminante de uma formação rochosa expunha o edifício a um corredor constante de ventos fortes.

Ao final, o local de instalação do telescópio foi definido em uma área próxima, em um terreno que aproveitava a estrada já existente e a relativa proximidade com um ramal da rede elétrica (Figura 3).

A escolha do sítio, em local ermo, em plena Caatinga, expôs o que se tornaria a questão crucial do projeto IMPACTON: a necessidade de parcerias institucionais para acesso e provimento de todas as facilidades necessárias para construção e operação do observatório. Para isso, o apoio⁶ da então existente representação do Ministério da Ciência e Tecnologia no Nordeste (ReNE/MCT)

⁶Cabe o agradecimento especial a Ivon Fittipaldi (*in memoriam*), ex-docente do Departamento de Física da UFPE e coordenador da ReNE/MCT, cuja atuação foi fundamental para o projeto.

foi fundamental para organizar a articulação entre as instituições do estado de Pernambuco.

Essas parcerias viabilizaram a solução de grandes e pequenas dificuldades. Questões que inicialmente pareciam corriqueiras, como o desembaraço alfandegário da cúpula e do telescópio no porto SUAPE em Recife, mas que tomaram dimensões insuspeitadas devido ao cipoal burocrático em que caíram; as obras civis do observatório, de uma simplicidade espartana, que atrasaram por muitos meses devido ao processo de licitação que não atraiu empresas interessadas; a instalação de uma subestação para abastecimento de energia elétrica, também submetida à licitação, que dependeu do único prestador do serviço da região, e muitos outros problemas de diversas naturezas.

Além das parcerias institucionais formais, cabe registrar o apoio de muitas pessoas que se envolveram no projeto nos diversos níveis de execução e sem as quais não teria sido possível, por exemplo, viabilizar transporte de equipamentos e de equipes técnicas, montagem de instrumentos pesados, hospedagem e trâmites burocráticos.

Por fim, em meados de 2010, o observatório já possuía uma infraestrutura mínima para receber a instalação dos instrumentos, embora ainda não contasse com o fundamental acesso à internet, uma vez que não existiam provedores locais. O acesso foi viabilizado por meio de um acordo de cooperação com a Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente do Estado de Pernambuco

Tabela 1: Quadro-síntese da implantação do OASI

Fase preliminar Junho/2005 a setembro/2007	Montagem da Infraestrutura Outubro/2007 a março/2011	Parcerias Institucionais
Especificação dos equipamentos e início do processo de importação	Compra dos equipamentos e demais suportes tecnológicos	Prefeitura de Itacuruba (PE)
Orçamentação e pedidos de financiamentos complementares	Definição do sítio	Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de Pernambuco
Estudos preliminares para escolha de sítio	Formação de parcerias institucionais	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
Composição da equipe executiva	Construção do observatório e instalação de energia elétrica e internet	Universidade Federal Rural de Pernambuco
	Recepção, guarda e transporte de equipamentos	Universidade Federal do Vale do São Francisco
	Instalação dos equipamentos e testes de operação	Associação Agropecuarista Lealdade de Santa Cruz

(Sectma),⁷ que integrou o observatório à Rede PE-Conectado.

Terminada a instalação do observatório, o início do funcionamento não se resumiu simplesmente em ligar os computadores, apontar o telescópio e começar a observar. Para grande decepção da equipe, ainda na fase de calibração e testes do telescópio, a câmera CCD foi queimada, provavelmente afetada por uma descarga de eletricidade estática.

O incidente provocou mais um período de atraso, até que, em 17 de março de 2011, finalmente foi tomada a primeira imagem de ciência, a “primeira luz” do telescópio. A Tabela 1 resume as principais etapas no processo de implantação do OASI e as parcerias institucionais envolvidas.

Uma das primeiras observações realizadas pelo telescópio foi a do asteroide “10468 Marcgraf”, em homenagem ao pioneirismo de Pernambuco na área de astronomia. O naturalista Georg Marcgraf (1610-1643) integrou a comitiva de Maurício de Nassau durante o domínio holandês e realizou importantes observações astronômicas no período em que esteve no Brasil, entre 1638 e 1643.

Mais tarde, em 2017, Itacuruba foi homenageada com a denominação do asteroide “10468 Itacuruba”, em agradecimento à cidade sertaneja que acolheu o Observatório Astronômico do Sertão de

Itaparica (OASI).

4 A operação do OASI

O observatório possui instalações simples. Uma sala de comando do telescópio, que divide espaço com a oficina de reparos, um quarto mobiliado com duas camas beliches, um banheiro e uma pequena cozinha onde reina a cafeteira. É o suficiente.

Os primeiros 34 meses de observações foram presenciais, porque não havia segurança operacional para a realização de observações remotas a partir do Rio de Janeiro. Dessa forma, foram estabelecidas missões com a presença de dois observadores que permaneciam no OASI durante 15 dias a cada mês, em torno da data da Lua nova, o período de céu mais escuro e apropriado à observação de asteroides.

Nessa primeira fase de operação, além dos pesquisadores, alguns alunos de mestrado e doutorado em astronomia do ON tiveram a oportunidade de contato direto com a instrumentação e a experiência ímpar de vida no Sertão. Não era fácil chegar ali e tampouco permanecer 15 dias. O isolamento era total, quebrado somente pelas eventuais refeições realizadas na cidade.

A viagem entre Rio de Janeiro e Itacuruba é longa, submetida a conexões de voos e a horários nada confortáveis. Na prática, são dois dias

⁷A Sectma é atualmente a Secretaria Estadual de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de Pernambuco (Secti).

de viagem, geralmente com pernoite em Petrolina (PE). Os quase 300 km desta cidade até Itacuruba são percorridos de carro, sempre com o cuidado de evitar o anoitecer na estrada. Trata-se de uma região com alto índice de violência e acidentes causados por animais na pista.

As operações remotas se tornaram viáveis quando, finalmente, foi possível contar com um técnico residente em Itacuruba para dar assistência noturna às observações. Embora, a princípio, todos os procedimentos necessários pudessem ser realizados de forma remota, sempre havia o risco de queda de energia ou do link de internet, travamento de computadores ou qualquer outra eventualidade.

A contratação desse técnico só ocorreu com a oportunidade de formatura da primeira turma do curso de informática do Instituto Federal do Sertão, campus Floresta, na qual havia três estudantes de Itacuruba. Os três foram capacitados para operação do telescópio e atualmente dois deles permanecem prestando serviço ao OASI.

O início da operação remota do OASI, em janeiro de 2014 representou uma nova fase para o projeto, de funcionamento pleno, dedicado à execução dos projetos científicos. Foram consolidadas as parcerias internacionais e a formação de estudantes nos cursos de mestrado e doutorado em astronomia do ON.

4.1 Os projetos científicos do OASI

Atualmente são conhecidos⁸ mais de 35 mil NEOs, um conjunto que é alimentado por um grande e crescente número de descobertas realizadas por programas de busca desses objetos. São exemplos o Catalina Sky Survey e o Pan-STARRS, ambos financiados pela NASA.

Porém, a caracterização física dos NEOs progride em ritmo muito mais lento do que as descobertas. Considerando que o brilho diminui com o afastamento do objeto, a maioria deles “desaparece” da possibilidade de observação em poucas semanas. Torna-se, então, fundamental um programa de observações que tenha como foco alguns alvos de interesse e um acompanhamento contínuo durante o tempo de melhor observação do objeto. Um planejamento que é muito facilitado

por um telescópio dedicado ao estudo desses corpos.

Basicamente, os projetos desenvolvidos no OASI utilizam fotometria de banda larga, em diversos comprimentos de onda, visando a caracterização física de objetos de interesse previamente selecionados. São determinadas: os elementos de órbita; as propriedades rotacionais (período e direção do eixo de rotação); a forma do objeto; a estrutura e a composição superficial e os índices de cor.

Um dos primeiros projetos concluídos no OASI foi um trabalho de dissertação de mestrado⁹ no qual, com dados astrométricos obtidos com observações de mais de vinte objetos, o OASI obteve o código de identificação (Y28) atribuído pelo Centro de Corpos Menores (MPC, da sigla em inglês para *Minor Planet Center*) da União Astronômica Internacional (IAU).

Durante alguns anos o OASI colaborou com o projeto NEOShield-2 da Comissão Europeia, dedicado à ciência e tecnologia para prevenção de impactos de objetos em órbitas próximas da Terra. Durante a vigência do projeto, as observações realizadas no OASI eram analisadas em conjunto com a equipe do Instituto Nazionale di Astrofisica (INAF) em Roma e publicadas nos boletins do MPC. Embora não seja a principal linha de pesquisa do OASI, as observações astrométricas continuam sendo realizadas para alvos de interesse.

Boa parte dos projetos em curso no OASI se constitui em trabalhos de dissertações e teses de mestrado e doutorado e projetos de pós-doutorado, com abordagens que visam perfazer a caracterização física dos objetos escolhidos para estudo. A primeira tese de doutorado¹⁰ com dados obtidos no OASI foi concluída em 2015, tendo como resultado a determinação de períodos de rotação precisos e modelos de forma para NEOs de interesse.

Outros projetos são realizados em cooperação com grupos de pesquisa internacionais. Uma des-

⁹M. De Prá, *Pipeline fotométrico para o projeto IMPACTON*, Dissertação de Mestrado em Astronomia, Observatório Nacional, Rio de Janeiro (2013).

¹⁰J. S. Silva, *Propriedades rotacionais, direção de polo e modelo de forma de asteroides em órbita próxima da Terra: primeiros resultados do Projeto IMPACTON*, Tese de Doutorado em Astronomia, Observatório Nacional, Rio de Janeiro (2015).

⁸Ver: <https://minorplanetcenter.net> Acesso em 15 julho 2024.



Figura 4: Noite de observação

sas colaborações é com a Universidade de la Republica (UDELaR), do Uruguai, para campanhas conjuntas de observações astrométrica e fotométrica no OASI e no Observatório Astronômico Los Molinos, do Uruguai, buscando principalmente asteroides com atividade cometária.

Cabe ainda destacar os trabalhos de colaboração com o NEO *Coordination Centre* da Agência Espacial Europeia (ESA, na sigla em inglês), para seguimento de objetos em órbitas próximas da Terra, e com o projeto *Neorocks*, também da ESA, que visa a formação de um banco de dados de propriedades físicas de asteroides.

5 Resultados Científicos

Em dezembro de 2013, quando foi encerrada a fase de testes e de operação presencial do OASI, haviam sido observados 55 objetos e estudadas suas propriedades físicas. O início da operação remota, com a presença de um técnico local, deu maior agilidade às observações.

Em que pese o período da pandemia de Covid-19 e os ciclos climáticos do Sertão, muitas vezes com intensas chuvas, em 13 anos de operação (até maio 2024), 830 pequenos corpos foram observados no OASI, sendo 70% deles objetos em órbitas próximas da Terra.

As observações no OASI compõem um banco de dados sobre a população de NEOs que vem se constituindo num dos principais resultados do projeto, de modo que 50% dessas observações já foram utilizadas em teses e dissertações e em publicações científicas.

A divulgação internacional dos resultados do

projeto segue em número crescente, alcançando 26 artigos publicados em revistas científicas indexadas e mais de 60 participações em congressos especializados. Além de cerca de 50 publicações técnicas no *Minor Planet Circular* do MPC. O crescimento da visibilidade do projeto vem permitindo o estabelecimento de novas colaborações com grupos de pesquisa internacionais para estudo de alvos para missões espaciais, programa de observações conjuntas e intercâmbio de pesquisadores.

A formação de recursos humanos é um dos aspectos mais bem-sucedidos do projeto IMPACTON. No que diz respeito a novos pesquisadores, no período foram formados 7 doutores e 7 mestres, além de diversos trabalhos de pós-doutorado e iniciação científica concluídos.

A formação se estende aos técnicos residentes em Itacuruba, que têm a oportunidade de uma capacitação diferenciada em instrumentação astronômica.

6 O alcance do OASI na região

Terminada a construção do OASI, antes mesmo de começar a operação do telescópio, a primeira iniciativa foi a de realizar um evento de portas abertas, para apresentar a obra que a cidade acompanhou e compartilhar os objetivos do projeto. O 1º Evento de Astronomia aconteceu em julho de 2011, contando com o envolvimento direto da prefeitura e a participação de clubes de astronomia da região.

Foi uma espécie de inauguração do observatório. Além da visita ao OASI, a cidade se mobilizou com palestras, oficinas de lançamento de foguetes na avenida principal, telescópios instalados na praça para observação do céu e uma solenidade com a presença de autoridades municipais.

A ideia era que esse primeiro evento viesse a criar um calendário anual. Uma iniciativa que poderia destacar o município que abrigava o segundo maior telescópio instalado em solo brasileiro e atrair apoios financeiros para projetos de divulgação científica e outras ações de desenvolvimento local.

Porém, o isolamento que torna o município atrativo para observações astronômicas, também dificulta a visitação. Não é simples chegar ao



Figura 5: Visitantes por ocasião da Semana-Pop sediada em Monteiro (PB), maio 2017.

OASI, localizado no meio da Caatinga, distante da sede do município, da rodovia e de outros centros urbanos. Sem contar com transporte público, mesmo as escolas da região dependem do nem sempre disponível transporte escolar para excursões.

A solução para manter um calendário de visitação ao OASI veio através da parceria com instituições de ensino e pesquisa da região, das quais é importante destacar: a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), com sedes em Recife e Serra Talhada; o Espaço Ciência de Pernambuco e o Instituto Nacional do Semiárido (INSA/MCTI), localizado em Campina Grande (PB).

As atividades no OASI, então, passaram a ser concentradas em duas datas principais. A primeira no mês de maio, na Semana de Popularização da Ciência do Semiárido Brasileiro (SPCSB) e, a segunda, em outubro, durante a Semana Nacional de Ciência e Tecnologia (SNCT).

A SPCSB, também chamada de Semana-Pop, tem como objetivo promover ações de divulgação científica e de educação ambiental que ampliem a percepção das potencialidades da região semiárida brasileira por seus cidadãos. Os eventos são itinerantes, realizados a cada ano em um município diferente, e formatados de modo a envolver,

além da prefeitura e de instituições de ensino e pesquisa existentes no entorno, as demais organizações locais (corpo de bombeiros, ONGs ambientalistas, aldeias indígenas, centros culturais, clubes de ciências, entre outras) nas diversas atividades voltadas para as escolas e o público em geral. Um dos pontos altos da programação é a visita ao OASI (Figura 5).

Divulgado o calendário, os interessados possuem tempo de organização. Muitas escolas, institutos federais e universidades já colocaram a visita ao OASI na sua programação acadêmica. Grupos de professores, clubes de astronomia e moradores de Itacuruba e de outros municípios também participam das atividades oferecidas: palestras, apresentação do funcionamento de telescópio, oficinas de lançamento de foguetes e observação do céu em telescópios portáteis.

Como resultado, depois da instalação do OASI, a pós-graduação em astronomia passou a receber muitos estudantes dos estados do Nordeste, particularmente de Pernambuco. Jovens que chegam ao Observatório Nacional motivados pela visita que realizaram ao OASI ou pelas informações que receberam sobre o grande telescópio instalado na região Semiárida.

Em 2024 o OASI completou 13 anos de operação. As dificuldades iniciais para instalação de

um observatório cederam lugar às relacionadas com a manutenção e atualização da infraestrutura. O isolamento do sítio continua cobrando o seu tributo e cresce a preocupação com o avanço da poluição luminosa nas pequenas localidades do entorno.

No entanto, mantêm-se firmes as motivações para operar um observatório dedicado ao estudo de asteroides no Semiárido brasileiro. A principal delas é o retorno científico expresso em publicações acadêmicas e na formação de pesquisadores, mostrando que conseguimos ocupar uma lacuna que estava aberta nessa área de pesquisa no Hemisfério Sul. Outro grande resultado tem sido verificar em cada visitante do OASI a compreensão de que a ciência não está apartada do resto do esforço humano.

Sobre a autora

Teresinha Rodrigues (teresinha@on.br) é pesquisadora colaboradora do Observatório Nacional (ON/MCTI). Aposentada em 2018, continua atuante como coordenadora da infraestrutura do OASI. Endereço para acessar o CV: <http://lattes.cnpq.br/0447358942103110>.

Leituras complementares

- [1] P. Arcoverde et al., *Physical properties of NEOs derived from their phase curves*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **523**(1), 739 (2023).
- [2] T. Rodrigues, *Espelho Cristalino: um observatório no Sertão de Itaparica* (Observatório Nacional, Rio de Janeiro, 2022).
- [3] E. Rondón et al., *OASI: A Brazilian Observatory Dedicated to the Study of Small Solar System Bodies—Some Results on NEO's Physical Properties*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **132**(1012), 065001 (2020).
- [4] E. Rondón et al., *Photometric characterization of NEOs: 3 Amor and 3 Apollon*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **484**(2), 2499 (2019).
- [5] IMPACTON, *Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional* (©2011). Disponível em <http://impacton.on.br/>, acesso em ago. 2024.

Ocultações estelares: os 10 anos da descoberta dos anéis de Chariklo e os avanços no estudo do Sistema Solar

Felipe Braga Ribas

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo

Há cerca de 10 anos anunciamos a descoberta do primeiro sistema de anéis ao redor de um pequeno corpo do Sistema Solar. A técnica de ocultações estelares, que permitiu o feito, vem sendo largamente utilizada para caracterizar objetos do Sistema Solar. Seu alto poder de resolução espacial tem permitido que dimensões e formas venham sendo obtidas, com grande precisão, para muitos objetos, desde aqueles próximos à Terra, até aqueles mais distantes do Sol. Além dos anéis de Chariklo descobertos em 2013, anéis já foram identificados ao redor do planeta-anão Haumea e do objeto transnetuniano Quaoar. Isto mostra que anéis podem ser comuns no Sistema Solar Exterior, já que limites previamente imaginados, como o Limite de Roche, não se aplicam à estes anéis. Os pesquisadores brasileiros e astrônomos cidadãos tem tido papel fundamental nesta pesquisa, a qual, graças ao *LSST*, deve expandir consideravelmente nos próximos anos.

Abstract

About 10 years ago, we announced the discovery of the first ring system around a Small Solar System Object. The feat was possible thanks to the use of the stellar occultation technique, which has been widely used to characterize objects in the Solar System. Its high spatial resolution allows determining the dimensions and shapes with great precision for many objects, from those close to Earth to those farthest from the Sun. In addition to the Chariklo rings discovered in 2013, rings have been identified around the dwarf planet Haumea and the trans-Neptunian object Quaoar. This shows that rings may be common in the Outer Solar System since previously imagined limits, such as the Roche Limit, do not apply to these rings. Brazilian researchers and citizen astronomers have played a fundamental role in this research, which, thanks to the *LSST*, may expand considerably in the coming years.

Palavras-chave: ocultações estelares, anéis, pequenos corpos do Sistema Solar, ciência cidadã

Keywords: stellar occultations, rings, small solar system objects, citizen science

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45931](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45931)

1 Introdução

Há pouco mais de 10 anos, no dia 26 de abril de 2014, anunciou-se a descoberta de uma nova estrutura no Sistema Solar! Pela primeira vez astrônomos observaram a presença de anéis ao redor de um pequeno corpo do Sistema Solar. A publicação na prestigiada revista *Nature* [1] foi liderada pelo brasileiro Prof. Dr. Felipe Braga Ribas (autor deste texto), com a participação de outros 11 pesquisadores brasileiros e mais 52 co-autores de instituições estrangeiras.

O primeiro pequeno corpo do Sistema Solar a ter anéis descobertos em seu entorno foi o objeto Centauro (10199) Chariklo. Um objeto com cerca de 250 km de diâmetro, que orbita o Sol entre

as órbitas de Saturno e Urano, a 18 unidades astronômicas (ua).¹ Dois anéis foram descobertos a distâncias de 385 e 400 km do centro de Chariklo (figura 1). Receberam a designação C1R e C2R, ou, no linguajar popular, “Oiapoque” e “Chui”. Tidos como anéis densos e confinados, com larguras de aproximadamente 7 e 3,5 km respectivamente, apresentam entre eles uma falha com cerca de 14 km de largura.

A descoberta se deu no contexto de uma co-

¹Uma unidade astronômica (ua) é a distância média da Terra ao Sol, o que equivale a 149.597.870,7 quilômetros. A partir do Sol, Júpiter encontra-se a cerca de 5,2 ua. Já Netuno está a aproximadamente 30 ua. O objeto do Sistema Solar, observado hoje em dia à maior distância do Sol, é o planeta-anão Éris, a 95 ua.

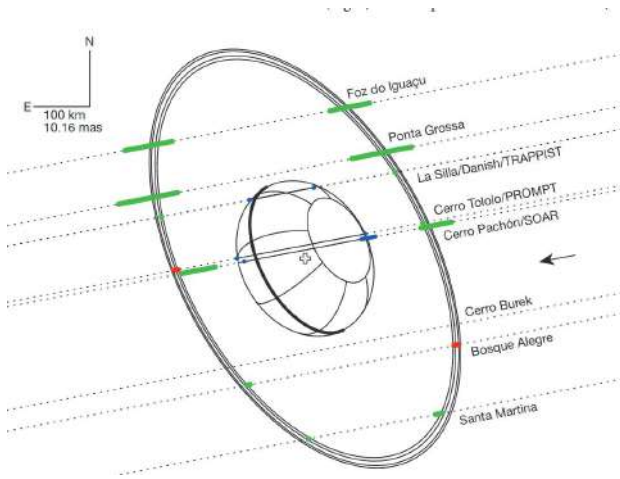


Figura 1: Gráfico apresentando em segmentos verdes as detecções dos anéis de Chariklo em 2013 [1]. Os nomes dos locais aonde as observações foram realizadas e as cordas em linhas pontilhadas são mostrados à direita. O corpo é representado pela elipse central.

laboração internacional entre pesquisadores do Brasil, França e Espanha, hoje conhecida como *Lucky Star*.² Este projeto usa a técnica de ocultações estelares (Seção 2) para medir as propriedades físicas dos pequenos objetos do Sistema Solar Exterior.³ Nesta região encontramos: os objetos Troianos, que seguem em órbitas nos pontos de Lagrange de Júpiter; depois por entre as órbitas dos planetas gigantes, encontramos os Centauros; por fim, em distâncias além da órbita de Netuno, encontram-se os Objetos Transnetunianos (TNOs).

De 2009 para cá, cerca de 150 objetos já foram estudados com esta técnica [2]. Destacam-se a descoberta das brilhantes superfícies de Éris e Makemake [3,4], o monitoramento das atmosferas de Plutão e Tritão [5,6], determinação da forma de Quaoar, Chiron, Echeclus, entre outros [7,8], a descoberta de grandes depressões nas superfícies dos TNOs 2003 AZ₈₄ e 2002 MS₄ [9,10], a caracterização de satélites de TNOs como Vanth, Weywot, Hi'iaka, Actea e Huya/1 [11–14], além, é claro, das descobertas de anéis, como será detalhado na seção 3.

²Website: <https://lesia.obspm.fr/lucky-star/>

³Chama-se de Sistema Solar Exterior a vasta região que se estende a distâncias superiores àquela da órbita de Júpiter, isto é $\gtrsim 5$ ua.

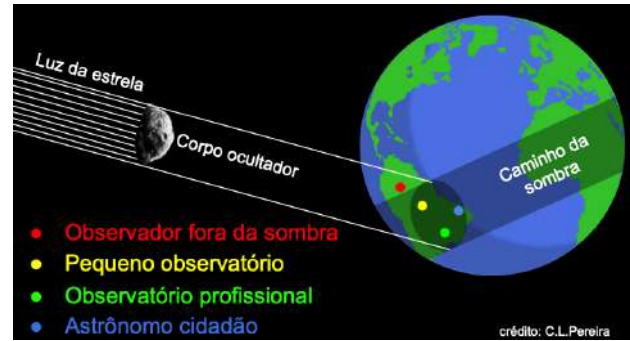


Figura 2: Esquema mostrando os raios de luz da estrela sendo bloqueados pelo corpo ocultador, com sua sombra sendo projetada na Terra. Cada observador cobre uma parte da sombra, medindo diferentes porções do perfil do objeto. Cada ponto representa um observador, que podem ser desde os mais avançados telescópios profissionais, até um pequeno telescópio amador. Créditos: Chrystian L. Pereira.

2 Ocultação Estelar

Uma ocultação estelar ocorre quando um objeto do Sistema Solar atravessa a linha de visada entre um observador e uma estrela. Similar a um eclipse solar, mas envolvendo uma estrela distante quase pontual. Sendo um objeto com órbita conhecida, a sua velocidade aparente (v_o) também o é. Assim mede-se quanto tempo ele demora para passar na frente da estrela (Δt) e, com a equação básica de movimento ($\Delta S = \Delta t \cdot v_o$) temos o tamanho do objeto. Isto é possível porque, sendo uma estrela distante, a sombra do objeto projetada sobre a Terra, terá exatamente o tamanho do objeto (figura 2). Assim, podemos distribuir vários observadores ao longo da sombra e cada um medirá um tamanho dela, o que chamamos de *corda*. Juntando as várias cordas temos o perfil do objeto, que poderá ser determinado com precisões na ordem do quilômetro. Isto, aliado a outras informações, como por exemplo curva de luz de rotação ou mesmo outras ocultações, nos permite determinar a sua forma tridimensional.

Para prever quando e onde um evento de ocultação estelar poderá ser observado, compara-se o seu movimento no céu (efeméride) com a posição das estrelas de fundo. Quando isto é feito considerando a Terra, geram-se *mapas de predição* que contêm informações relevantes para a observação e indicam visualmente onde o evento poderá ser detectado (figura 3).

Páginas web como o site Lucky Star, o LIneA-

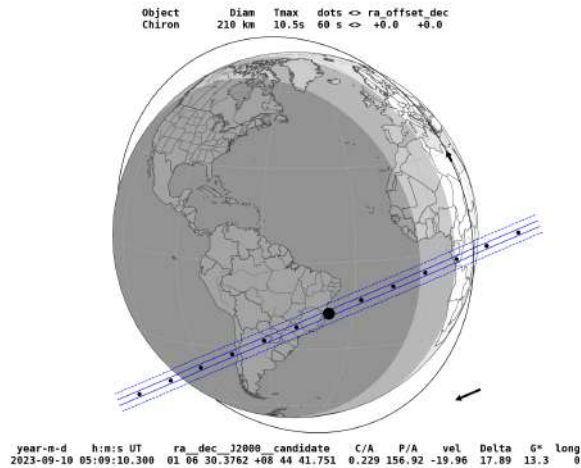


Figura 3: Exemplo de mapa de previsão de ocultação. Acima e abaixo do globo terrestre figuram informações sobre o evento e sobre a estrela ocultada. As linhas azuis delimitam a região onde a passagem da sombra será visível. Os pontos em preto são espaçados em intervalos de um minuto, e a direção de deslocamento da sombra é apresentada pela seta à direita e abaixo. Vemos também a representação da órbita de um telescópio espacial, que poderia observar o evento do espaço.

OPD⁴ e OWC,⁵ dedicam-se a fornecer estas previsões, as quais estão sujeitas a incertezas inerentes à qualidade da órbita do objeto e da posição das estrelas envolvidas.

Para registrar uma ocultação, toma-se uma sequência de imagens da estrela a ser ocultada durante um intervalo de tempo. O brilho (ou fluxo) da estrela em cada uma das imagens é medido e comparado com outras estrelas no campo. Enquanto o objeto atravessa a linha de visada do observador, o brilho da estrela será bloqueado. Portanto, poderemos medir qual o instante em que a estrela foi ocultada e também quando deixou de ser ocultada. Esta técnica é conhecida como fotometria diferencial de abertura, e nos fornece uma *curva de luz de ocultação*, ou seja, a variação do fluxo do alvo ao longo do tempo (figura 4).

A duração de um evento de ocultação varia de alguns décimos de segundo a alguns minutos, a depender, é claro, do tamanho e velocidade do objeto e qual a região da sombra o observador se encontrava. Para poder determinar o tamanho e a forma do objeto, é necessário conhecer a posição geográfica de cada observador. Também

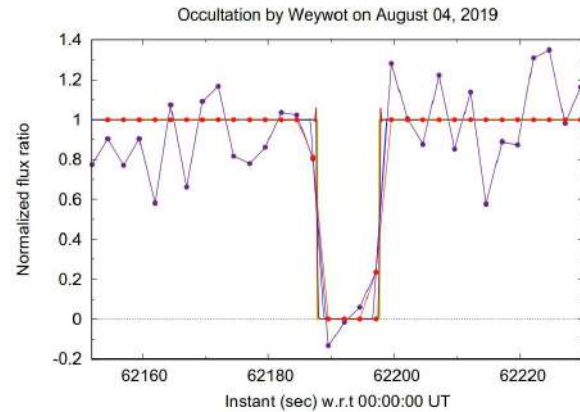


Figura 4: Exemplo de uma curva de luz de ocultação. Os pontos e linha em roxo representam o fluxo da estrela em cada imagem obtida pelo observador. Em vermelho temos a curva e luz modelada com a qual determinam-se os instantes de ingresso e egresso da estrela, isto é, início e fim da ocultação.

é fundamental que todos registrem o tempo de cada imagem sob a mesma *referência de tempo*, preferencialmente ao tempo fornecido por satélites GPS. Por estas razões, câmeras astronômicas de alta sensibilidade,⁶ com capacidade de obter várias imagens por segundo e ligadas a antenas GPS são geralmente utilizadas para registrar estes eventos.

A análise é feita com o uso de programas de fotometria [15] e de modelagem da curva de luz, para obter os instantes de início e fim do evento, e para determinar a posição da corda de cada observador, como o *SORA*⁷ [16].

2.1 Ciência Cidadã

Os eventos de ocultação são observados em campanhas observacionais organizadas por diferentes grupos de pesquisa. Estes grupos tem propósitos distintos, como estudar alvos de missões espaciais (*Lucy*), descoberta de satélites de asteroídes (*Gaia Moons*), caracterização de objetos cruzadores da órbita da Terra (*ACROSS*), ou estudar o Sistema Solar Exterior (*Lucky Star*). Um ponto em comum entre estes diferentes projetos é a *fundamental participação de astrônomos amadores* e pequenos observatórios em diferentes regiões do globo, capazes de monitorar estes eventos.

⁴LIneA Occultation Prediction Database

⁵Occult Watcher Cloud

⁶Exemplos: QHY174M-GPS ou ASTRID.

⁷Stellar Occultation Reduction and Analysis

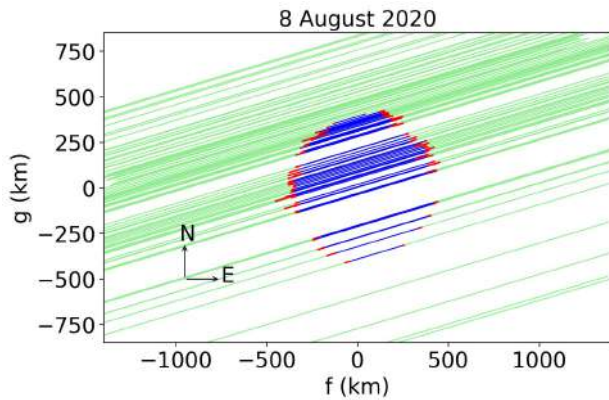


Figura 5: Exemplo de uma ocultação com muitos observadores (linhas verdes). Em azul temos as cordas de detecção da sombra. Pode-se ver claramente o perfil do objeto no momento do evento. Graças ao elevado número de detecções, foi possível descobrir uma depressão na porção nordeste do objeto [10].

Considerando que, quanto maior o número de observadores em um evento de ocultação, mais informações poderemos obter (figura 5), e que a técnica é relativamente simples, eventos de ocultações estelares são ideais para o desenvolvimento da *Ciência Cidadã*. Associações como a *International Occultation Timing Association*⁸ ou a Rede *Unistellar*,⁹ promovem e organizam mundialmente a observação de ocultações estelares pela comunidade amadora, composta por mais de dois mil membros.

No Brasil, a participação de astrônomos amadores ainda é muito tímida, mas, com o aumento do acesso a telescópios robotizados e o barateamento de câmeras rápidas, o número de astrônomos cidadãos, clubes de astronomia, universidades e mesmo escolas participando destas campanhas vêm aumentando gradualmente.

3 Anéis ao redor de pequenos corpos

Os quatro planetas gigantes do Sistema Solar possuem anéis. Diferente dos majestosos anéis de Saturno, os demais planetas possuem anéis tênues, que só foram descobertos com o avanço da tecnologia. Os anéis de Júpiter foram descobertos pela missão espacial Voyager I, já os anéis de Urano e Netuno foram descobertos à partir da

observação de ocultações estelares e, posteriormente, fotografados pela sonda Voyager II.

Anéis ao redor de pequenos corpos só passaram a ser estudados após a descoberta dos anéis de Chariklo em 2013 [17]. A partir de então, investigar a presença de anéis ao redor dos pequenos corpos passou a ser tão relevante quanto saber a sua composição, variação de brilho, forma e densidade, ou seja, é mais uma das propriedades físicas que justificam as pesquisas no tema.

Esta investigação tem rendido frutos, com a descoberta de novos anéis ao redor de (136108) Haumea, em 2017 [18], de (50000) Quaoar, em 2023 [8, 19], e, ainda sob análise [20], os possíveis anéis de (2060) Chiron.

3.1 Anéis de (10199) Chariklo

Chariklo é o maior dos objetos Centauros, que são uma classe de pequenos corpos com órbitas dinamicamente instáveis, que permeiam as órbitas dos planetas gigantes. Isto já era motivo suficiente para estudá-lo, por isto monitoramos a ocultação prevista para o dia 03 de junho de 2013, usando telescópios no Brasil, Argentina, Uruguai e Chile. Três telescópios detectaram a ocultação pelo corpo central. Surpreendentemente, junto com outros quatro telescópios, eventos secundários também foram detectados.

A curva de luz obtida com o telescópio Dina-marquês de 1,5 m em La Silla/Chile (figura 6) mostrou, claramente, os eventos secundários, simetricamente espaçados. Apoiados pelos eventos secundários detectados nos outros observatórios, não restaram dúvidas sobre a descoberta dos anéis (figura 1).

Observações realizadas nos anos seguintes revelaram muitos detalhes sobre a propriedades físicas, tanto dos anéis, quanto do próprio Chariklo [21, 22]. Por exemplo, a partir do trabalho liderado pelo brasileiro Prof. Dr. Bruno Morgado, sabe-se que os dois anéis possuem importante variação na quantidade de material ao longo das suas larguras, sendo que o mais interno e denso, o C1R, possui uma estrutura em W. Também sabe-se que Chariklo é um objeto triaxial com semi-eixos 144 x 125 x 110 km. Recentemente, até o JWST¹⁰ foi utilizado para observar uma ocultação pelos anéis de Chariklo [23].

⁸IOTA

⁹Unistellar Network

¹⁰James Webb Space Telescope

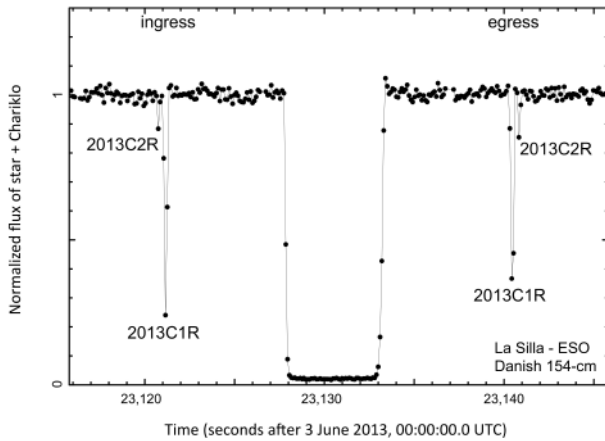


Figura 6: Curva de luz da ocultação de Chariklo obtida com o telescópio Dinamarquês em La Silla/Chile. As detecções secundárias, que permitiram a descoberta dos anéis, estão marcadas por 2013C1R e 2013C2R. No centro vemos a ocultação por Chariklo [17].

3.2 Anel de (136108) Haumea

O planeta-anão (136108) Haumea, com cerca de 1595 km de diâmetro, é um dos objetos mais intrigantes do Sistema Solar. Seu formato lembra o de uma bola de *rugby*, consequência da sua rápida rotação, com um período de apenas 3,91 horas. Possui uma mancha avermelhada em sua superfície e ao menos dois satélites: Hi'iaka com 370 km e Namaka com 170 km. Ele orbita o Sol na região transnetuniana, a mais de 51 ua de distância (bem mais distante do que Plutão, que está a ~ 34 ua).

Até hoje, apenas uma única ocultação estelar por Haumea foi observada, já que ele encontra-se em uma região do céu com poucas estrelas. O evento ocorreu em 21 de janeiro de 2017 e contou com a participação de 12 observatórios. Além de revelar semi-eixos do Haumea (1161 x 852 x 513 km) com grande precisão, a ocultação também revelou a presença de um anel confinado, com cerca de 70 km de largura, com um raio de de 2287 km [18] (figura 7).

O trabalho, que contou com a colaboração de 8 brasileiros, foi liderado pelo espanhol Dr. José-Luis Ortiz e foi publicado na revista *Nature*, em 2017. Revelou não só os anéis, mas também que estas estruturas são mais comuns do que pensávamos, e que elas podem existir em diferentes tipos de objetos, mesmo a grandes distâncias do Sol.

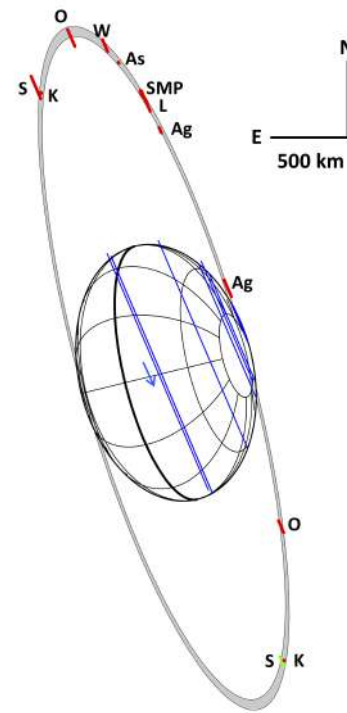


Figura 7: Gráfico da ocultação por Haumea. Os segmentos vermelhos mostram as detecções secundárias, evidenciando a presença do anel. Em azul vemos as detecções do corpo principal. A seta mostra a direção de deslocamento da sombra [18].

3.3 Anéis de (50000) Quaoar

Outro grande objeto transnetuniano, o (50000) Quaoar, teve suas dimensões determinadas em uma ocultação ocorrida em 2011 [17], mostrando um diâmetro de 1110 km. Este corpo orbita o Sol a uma distância de 42 ua (também mais distante do que Plutão) e possui uma lua de 170 km, chamada de Weywot. A fim de melhor caracterizá-lo, ocultações estelares promovidas por ele continuaram a ser observadas. Foi em 2021 que o Prof. Morgado percebeu que dados obtidos com o telescópio espacial CHEOPS,¹¹ com o Gran Telescópio Canárias (GTC) e dados obtidos por amadores, quando analisados em conjunto, revelavam a presença de um anel ao redor do corpo. Um anel dito não homogêneo, por ser denso em algumas partes e muito tênue em outras, com larguras de 336 a 5 km, e um raio 4050 km. Os resultados foram publicados em 2023 [19] (exatamente 10 anos após a primeira observação dos anéis de Chariklo), também na revista *Nature* e liderados pelo

¹¹CHaracterising ExOPlanet Satellite

Prof. Morgado, com a participação de outros 12 brasileiros.

No dia 08 de agosto de 2022, foi previsto que Quaoar ocultaria uma estrela brilhante no infravermelho, cruzando os observatórios do Haváí/EUA. Realizou-se, então, uma campanha observacional nos Estados Unidos e México, envolvendo 29 locais. Apenas 9 observatórios puderam obter dados (não foram afetados pelo clima). Dentre eles, os telescópios Gemini Norte e o CFHT (*Canada France Hawaiian Telescope*), os mais potentes observatórios envolvidos. O trabalho, liderado pelo brasileiro Dr. Chrystian Luciano Pereira, publicado em 2023 e envolvendo outros 10 brasileiros, revelou não somente detalhes sobre a estrutura do anel de Quaoar (Q1R), como também a presença de um segundo anel (Q2R), mais interno e tênue, com largura de 10 km e um raio de 2520 km [8].

Diferente de todos os anéis conhecidos até então, os anéis de Quaoar estão muito *além do Limite de Roche*¹² (figura 8). Mostrou-se que, com um maior coeficiente de restituição na colisão elástica entre as partículas de gelo, sua velocidade de repulsão é maior que a velocidade de escape, explicando, assim, porque elas não se aglutinam, mesmo além do Limite de Roche. Este surpreendente resultado expandiu novamente os limites previamente imaginados para a presença de anéis no Sistema Solar.

3.4 Anéis em (2060) Chiron?

O objeto Centauro (2060) Chiron, descoberto em 1977, já foi chamado de cometa (95P/Chiron) quando, em 1988, desenvolveu uma coma. É um corpo alongado com semi-eixos 126 x 109 x 68 km, determinados a partir de uma ocultação estelar em 2019 [7]. Observações de ocultações estelares em 1993 e 1994 mostraram a presença de material confinado no seu entorno, na época interpretados como jatos de poeira. Uma ocultação em 2011 detectou eventos secundários, aparentemente si-

¹²Em 1848, Édouard Roche publicou sua teoria, puramente gravitacional, demonstrando que objetos em órbita seriam quebrados em pedaços a distâncias inferiores a, aproximadamente, 2,5 vezes o raio do corpo central, dependendo da sua densidade. Por outro lado, caso um disco de material atingisse distâncias superiores a $\sim 2,5$ raios do corpo central, ele deixaria de existir, formando um satélite.

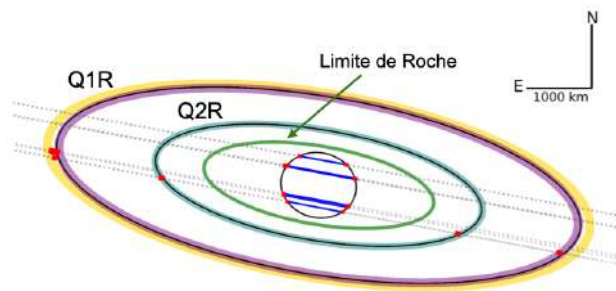


Figura 8: Gráfico mostrando as detecções de Quaoar, e seus anéis, no evento de 8 de agosto de 2022 [8]. A posição do Limite de Roche é indicada, evidenciando que os anéis encontram-se à distâncias muito superiores ao que se supunha como limite.

métricos em distância em relação ao centro de Chiron. Estes eventos foram interpretados por diferentes pesquisadores como anéis similares aos de Chariklo [24], como jatos ou como uma casca de poeira [25].

Uma nova ocultação observada em dezembro de 2022, ocorrida após um súbito aumento de brilho de Chiron, detectou novamente eventos secundários, mais profundos do que aqueles observados anteriormente [20]. Em setembro de 2023, observamos um novo evento, desta vez no Brasil. Os dados, ainda em análise, obtidos no Observatório do Pico dos Dias (OPD),¹³ mostram que há bastante material ao redor de Chiron e podem confirmar a presença de anel. Mas, sobretudo, mostram que Chiron tem um ambiente em transformação ao seu redor.

3.5 Questões em aberto

Não restam muitas dúvidas de que anéis ao redor de pequenos corpos são uma característica comum no Sistema Solar Exterior. Eles já foram encontrados ao redor de corpos de 100 a 1500 km, em Centauros, planeta-anão e TNO, distantes de 15 a 51 ua. No entanto, ainda não se sabe o que mantém estes anéis confinados. É necessário descobrir qual o mecanismo físico capaz de manter as partículas onde são encontradas, contrabalaneando a dissipação de energia causada pela colisão entre as partículas e a pressão de radiação provocada pelo Sol.

¹³O OPD pertence ao Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA) e abriga, no sul de Minas Gerais, o maior telescópio em solo nacional, cujo diâmetro do espelho principal é de 1,6 m.

A principal pista parece estar ligada à localização dos anéis em relação ao corpo central. Os principais anéis estão a uma distância próxima à ressonância spin-órbita 1:3.¹⁴ Nela, enquanto o corpo realiza três rotações, as partículas do anel completam uma órbita ao redor do corpo. Já o anel mais interno de Quaoar está próximo à ressonância 5:7. Trabalhos têm estudado como a forma do objeto, ou uma anomalia de massa no corpo, podem interagir com as partículas dos anéis, provocando este confinamento [26]. Simulações computacionais de N-corpos também mostraram que a presença de pequenos satélites,¹⁵ próximos aos anéis, poderiam manter os anéis de Chariklo [25].

Várias hipóteses já foram colocadas em relação à origem, mas todas recaem na formação de um disco de material, que pouco a pouco é confinado na região atual. Talvez, a origem de tal disco seja diferente para cada um dos sistemas, podendo ser: i) primordial, ou seja, da época da formação do corpo central; ii) originado após um evento de colisão no corpo principal; iii) ou a partir de uma ejeção de material da superfície do objeto.

Todas estas dúvidas são assuntos de pesquisa em andamento por diferentes grupos no mundo. Certamente novas observações trarão elementos para avançarmos nestes estudos. Isto mostra como o assunto é abrangente e com potencial de trazer novas informações para compreendermos melhor a formação do Sistema Solar.

4 Perspectivas futuras

Nos últimos 10 anos, depois de descobrir que pequenos corpos do Sistema Solar podem possuir anéis, entendemos que estas estruturas são bastante complexas, encontradas em diferentes ambientes, distâncias e formas, e que suas origens podem ser diversas.

O uso da técnica de ocultações estelares para estudar o Sistema Solar tornou-se essencial em

¹⁴Uma ressonância orbital ocorre quando dois objetos exercem uma força gravitacional um sobre o outro, em períodos regulares. Isto ocasiona uma troca de energia entre os corpos, alterando as suas órbitas. Em alguns casos, pode provocar a estabilização de órbitas em razões inteiras. Como exemplo temos a ressonância 2:3 entre Plutão e Netuno, onde, enquanto o planeta realiza três órbitas ao redor do Sol, o planeta-anão realiza exatamente 2.

¹⁵Satélites com poucos quilômetros de diâmetro, ainda desconhecidos.

diversos aspectos, dando suporte a missões espaciais, caracterizando diferentes classes de objetos ou descobrindo novas estruturas. As ferramentas para análise dos dados de ocultações estelares avançaram muito neste período, permitindo não só a caracterização de anéis, mas também a análise de uma grande quantidade de dados. Mais de 25 corpos do Sistema Solar Exterior já tiveram trabalhos publicados, com caracterização precisa de seus tamanhos, formas, volume e ambiente ao seu redor (anéis, detritos ou atmosferas) ou, até mesmo, descobertas características topográficas em seus limbos. O novo desafio é a observação de satélites destes corpos. Amadores têm descoberto satélites de asteroides usando ocultações. Já os pesquisadores têm usado imagens de alta resolução, para determinar as órbitas de satélites de TNOs, permitindo a previsão de eventos de ocultação [12].

Novas ferramentas, como o LIneA OPD, SORA [16] e o Occultation Portal¹⁶ [27] têm permitido a análise massiva de ocultações estelares. Isto será fundamental na era do *LSST*,¹⁷ quando o número de predições e, portanto, observações de ocultações poderá ser multiplicado por um fator dez, a depender somente dos observadores estarem prontos para o registro.

Esta nova era é uma oportunidade para desenvolvermos a rede nacional de observadores de ocultações estelares, quando astrônomos amadores, clubes de astronomia ou estudantes terão a chance de usar seus telescópios para coletar dados científicos e tornarem-se cientistas cidadãos, ou, eventualmente, construir suas carreiras como pesquisadores na área. Certamente, novos anéis, discos de poeira, atmosferas, satélites ou objetos duplos serão descobertos. Os pesquisadores brasileiros estão entre os principais pesquisadores mundiais na área, sendo responsáveis pela descoberta de dois dos três sistemas de anéis confirmados e diretamente envolvidos nos demais sistemas

¹⁶O *Occultation Portal* é de uma plataforma, usada pelo Lucky Star e outros projetos, para organização de campanhas observacionais e coleta de dados de ocultações.

¹⁷O *Lagacy Survey of Space and Time*, que começará ainda este ano as operações no Observatório Vera Rubin, no Chile, irá descobrir dezenas de milhares novos pequenos corpos do Sistema Solar Exterior. Cada um deles será observado várias vezes por ano, permitindo que conheçamos muito bem suas efemérides e, portanto, tenhamos ótimas predições de ocultações.

propostos. Agora é hora da comunidade brasileira aproveitar nosso imenso território e contribuir de maneira expressiva para aumentar o número de ocultações estelares observadas no Brasil.

Agradecimentos

A maior parte dos trabalhos citados aqui são frutos do *Grupo do Rio*. Um grupo que nasceu com pesquisadores do Observatório Nacional e Observatório do Valongo (liderados pelo Dr. Roberto Vieira Martins) e ganhou este carinhoso nome dos colaboradores internacionais, quando se referem aos organizadores das campanhas observacionais para o registro de ocultações estelares no mundo todo, ou às descobertas de anéis e estudo de propriedades físicas de objetos do Sistema Solar Exterior. Trabalho este realizado em colaboração com pesquisadores do Observatório de Paris-Meudon (liderados pelo Dr. Bruno Sicardy), na França, e do Instituto de Astrofísica de Andaluzia (liderados pelo Dr. José Luis Ortiz), na Espanha. Hoje, o Grupo do Rio conta com pesquisadores do Observatório Nacional (ON/MCTI), Observatório do Valongo (OV/UFRJ), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-Curitiba), Universidade Federal de Uberlândia (IF/UFU), Universidade Estadual de São Paulo, Guaratinguetá (UNESP-FEG) e do Laboratório Interinstitucional de e-Astronomia (LIneA). Por isto, deixo aqui o meu agradecimento aos Doutores Roberto Vieira Martins, Bruno Sicardy, José Luis Ortiz, Marcelo Assafin, Julio Camargo, Josselin Desmars, Frederic Vachier, Bruno Morgado, Altair Ramos Gomes Jr., Gustavo Rossi, Rodrigo Bouffleur, Rafael Sfair, Yücel Kiliç, Flavia Rommel e Chrystian Pereira, aos meus orientandos Giuliano Margoti e Eros Gradovski, bem com aos demais estudantes do grupo. O autor agradece ao apoio financeiro da CNPq (316604/2023-2) e suporte do LIneA.

Sobre o autor

Felipe Braga Ribas (fribas@utfpr.edu.br) é especialista em caracterização física de pequenos corpos com o uso de ocultações estelares. É pesquisador bolsista produtividade do CNPq. Ga-

nhou o Grande prêmio de Tese da CAPES em 2014 e teve seu nome dado ao asteroide (10999) Braga-Ribas. É Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-Curitiba) desde 2015, docente permanente do Programa de Pós-graduação em Física e Astronomia da UTFPR e do Programa de Pós-graduação em Astronomia do Observatório Nacional, e membro do BPG-LSST (*Brazilian Participation Group*).

Referências

- [1] F. Braga-Ribas et al., *A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo*, *Nature* **508**(7494), 72 (2014). [ArXiv:1409.7259](#).
- [2] F. Braga-Ribas et al., *Database on detected stellar occultations by small outer Solar System objects*, *Journal of Physics: Conference Series* **1365**(1), 012024 (2019).
- [3] B. Sicardy et al., *Constraints on Charon's Orbital Elements from the Double Stellar Occultation of 2008 June 22*, *The Astronomical Journal* **141**(2), 67 (2011).
- [4] J. L. Ortiz et al., *Albedo and atmospheric constraints of dwarf planet Makemake from a stellar occultation*, *Nature* **491**(7425), 566 (2012).
- [5] E. Meza et al., *Lower atmosphere and pressure evolution on Pluto from ground-based stellar occultations, 1988-2016*, *Astronomy & Astrophysics* **625**, A42 (2019). [ArXiv:1903.02315](#).
- [6] J. Marques Oliveira et al., *Constraints on the structure and seasonal variations of Triton's atmosphere from the 5 October 2017 stellar occultation and previous observations*, *Astronomy & Astrophysics* **659**, A136 (2022). [ArXiv:2201.10450](#).
- [7] F. Braga-Ribas et al., *Constraints on (2060) Chiron's size, shape, and surrounding material from the November 2018 and September 2019 stellar occultations*, *Astronomy & Astrophysics* **676**, A72 (2023). [ArXiv:2308.10042](#).

- [8] C. L. Pereira et al., *The two rings of (50000) Quaoar*, *Astronomy & Astrophysics* **673**, L4 (2023). [ArXiv:2304.09237](#).
- [9] A. Dias-Oliveira et al., *Study of the Plutino Object (208996) 2003 AZ₈₄ from Stellar Occultations: Size, Shape, and Topographic Features*, *The Astronomical Journal* **154**(1), 22 (2017). [ArXiv:1705.10895](#).
- [10] F. L. Rommel et al., *A large topographic feature on the surface of the trans-Neptunian object (307261) 2002 MS₄ measured from stellar occultations*, *Astronomy & Astrophysics* **678**, A167 (2023). [ArXiv:2308.08062](#).
- [11] A. A. Sickafoose et al., *A stellar occultation by Vanth, a satellite of (90482) Orcus*, *Icarus* **319**, 657 (2019). [ArXiv:1810.08977](#).
- [12] F. Braga-Ribas et al., *Present and Future of Stellar Occultation by Transneptunian Satellites and Binaries and their use to update the orbits of Vanth and Weywot* (2024), submetido ao Philosophical Transactions A.
- [13] E. Fernández-Valenzuela et al., *Physical properties of Hi'iaka from stellar occultation data* **53**(7) (2021). Disponível em <https://baas.aas.org/pub/2021n7i503p05>, acesso em set. 2024.
- [14] F. L. Rommel et al., *Physical properties of (38628) Huya and its satellite from stellar occultations* (2024), submetido ao Planetary and Space Journal.
- [15] M. Assafin, *Differential aperture photometry and digital coronagraphy with PRAIA*, *Planetary and Space Science* **239**, 105816 (2023). [ArXiv:2311.14152](#).
- [16] A. R. Gomes-Júnior et al., *SORA: Stellar Occultation Reduction and Analysis*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (2022). [ArXiv:2201.01799](#).
- [17] F. Braga-Ribas et al., *The Size, Shape, Albedo, Density, and Atmospheric Limit of Transneptunian Object (50000) Quaoar from Multi-chord Stellar Occultations*, *The Astrophysical Journal* **773**(1), 26 (2013).
- [18] J. L. Ortiz et al., *The size, shape, density and ring of the dwarf planet Haumea from a stellar occultation*, *Nature* **550**(7675), 219 (2017). [ArXiv:2006.03113](#).
- [19] B. E. Morgado et al., *A dense ring of the trans-Neptunian object Quaoar outside its Roche limit*, *Nature* **614**(7947), 239 (2023).
- [20] J. L. Ortiz et al., *Changing material around (2060) Chiron revealed by an occultation on December 15, 2022*, *Astronomy & Astrophysics* **676**, L12 (2023). [ArXiv:2308.03458](#).
- [21] D. Bérard et al., *The Structure of Chariklo's Rings from Stellar Occultations*, *The Astronomical Journal* **154**(4), 144 (2017). [ArXiv:1706.00207](#).
- [22] B. E. Morgado et al., *Refined physical parameters for Chariklo's body and rings from stellar occultations observed between 2013 and 2020*, *Astronomy & Astrophysics* **652**, A141 (2021). [ArXiv:2107.07904](#).
- [23] P. Santos-Sanz et al., *The rings of Centaur Chariklo revealed by a stellar occultation observed by JWST*, *Bulletin of the AAS* **55**(8) (2023). Disponível em <https://baas.aas.org/pub/2023n8i301p07>, acesso em set. 2024.
- [24] J. L. Ortiz et al., *Possible ring material around centaur (2060) Chiron*, *Astronomy & Astrophysics* **576**, A18 (2015). [ArXiv:1501.05911](#).
- [25] A. A. Sickafoose et al., *Material Around the Centaur (2060) Chiron from the 2018 November 28 UT Stellar Occultation* (2023). [ArXiv:2310.16205](#).
- [26] B. Sicardy et al., *Ring dynamics around non-axisymmetric bodies with application to Chariklo and Haumea*, *Nature Astronomy* **3**, 146 (2019). [ArXiv:1811.09437](#).
- [27] Y. Kilic et al., *Occultation portal: A web-based platform for data collection and analysis of stellar occultations*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **515**(1), 1346 (2022). [ArXiv:2206.09615](#).

Achatamento rotacional dos planetas

J. A. de Freitas Pacheco

Observatoire de la Côte d'Azur, França

Resumo

Corpos celestes em rotação não possuem simetria esférica, pois a gravidade efetiva é menor no equador do que nos polos. A deformação depende não somente da velocidade de rotação mas também da estrutura interna do corpo. Neste artigo, a deformação ou “achatamento” dos planetas do sistema solar, devido a rotação dos mesmos, é estimada modelizando tais corpos como um “fluido” ou como um corpo “elástico”. A comparação com as observações permite obter informações sobre a estrutura interna.

Abstract

Rotating celestial bodies do not have spherical symmetry, since the effective gravity is different between the poles and the equator. Deviation from sphericity, dubbed the flattening of the body, depends on the rotation velocity but also on the internal structure. In this article the flattening of solar system planets is calculated by considering these bodies either as an incompressible fluid or constituted by an elastic material. Comparison with data permits to obtain information about the internal structure of these bodies.

Palavras-chave: achatamento dos planetas, achatamento rotacional, Sistema Solar.

Keywords: flattening of planets, rotational flattening, solar system.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.44870](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.44870)

1 Introdução

Um dos sucessos da teoria da gravitação de Isaac Newton refere-se ao cálculo do achatamento do globo terrestre devido sua rotação. Em outras palavras, a forma da Terra não deveria ser à de uma esfera mas sim à de um elipsoide com o eixo polar menor que o eixo equatorial. O achatamento f é definido pela razão entre a diferença entre os raios equatorial e polar e o raio médio da configuração. O cálculo de f para um dado planeta e em particular para a Terra, implica em hipóteses sobre a estrutura interna. Newton, em 1687, em suas estimativas modelizou a Terra como um fluido incompressível e homogêneo, com uma velocidade angular constante [1]. Ele obteve $f = 1/230$, valor muito próximo do atual, considerando a pouca precisão dos valores conhecidos na época, tanto da densidade média da Terra como da constante gravitacional. Em 1735, a pedido de Luiz XV, uma expedição organizada pela Academia de Ciências da França efetuou medidas de arcos na superfície terrestre [2], próximos do equador e do polo, obtendo $f = 1/178$, o que permitiu uma confirmação da previsão de Newton.

Deve-se mencionar que valores modernos, estimados por métodos diferentes e em particular por satélites artificiais, indicam $f = 1/298,25$; próximo do valor estimado originalmente por Newton.

O cálculo do achatamento terrestre foi motivo de inúmeras investigações por físicos e matemáticos célebres no decorrer destes últimos três séculos como, Descartes, Maupertius, Clairaut, Bernoulli, MacLaurin, Euler, d'Alembert, Jacobi, Lagrange, Cavendish, Laplace, Gauss, Poisson, Cauchy, entre outros. Na realidade, a questão aparentemente simples de modelizar um planeta como um fluido ou como um corpo elástico (ou rígido) submetido ao seu próprio campo gravitacional, é mais complexa do que se possa imaginar. O problema pode ser, em princípio, definido da seguinte forma: considera-se um corpo de referência no qual, inicialmente, a auto gravitação é desprezada. Neste caso, o corpo é desprovido de tensões, é homogêneo ou seja, compressível e elástico. Em seguida, considera-se o corpo sujeito ao seu próprio campo gravitacional, situação que define um planeta "elástico". A questão agora é encontrar as configurações possíveis de equilíbrio. Em geral,

uma hipótese importante discutida por Love [3,4] é considerada, isto é, admite-se que o corpo esteja em um estado de equilíbrio hidrostático. Esta hipótese altera a natureza inicial do problema, que agora se assemelha ao estudo do equilíbrio de um corpo constituído por um fluido. Se as tensões presentes no corpo são suficientemente pequenas, pode-se utilizar a teoria linear da elasticidade e os leitores interessados em maiores detalhes podem encontrar uma análise mais completa, por exemplo, no livro de Landau & Lifshitz sobre a teoria da elasticidade [5].

Neste artigo desenvolveremos uma análise simples do problema do achatamento rotacional dos planetas do Sistema Solar dirigida aos estudantes e aos não especialistas. Consideraremos inicialmente os planetas modelizados como um fluido e em seguida introduziremos modelos submetidos a tensões elásticas, os quais serão comparados a um planeta considerado como constituído por um fluido ideal. Em geral, serão considerados casos em que a velocidade de rotação é pequena, o que implica em um achatamento $f \ll 1$ ou, em outras palavras, um pequeno desvio da forma esférica.

2 O modelo fluido

Como mencionado acima, na aproximação “fluido” o planeta é suposto satisfazer a equação de equilíbrio hidrostático, isto é

$$\vec{\nabla}P + \rho\vec{\nabla}W = 0 \tag{1}$$

Supondo-se que a forma do planeta em rotação uniforme é a de um esferoide oblato, portanto com simetria azimutal, a pressão P do fluido assim como sua densidade ρ dependem somente das coordenadas esféricas (r, θ) . Na equação acima, W é o potencial efetivo que definiremos mais abaixo. Se a pressão do fluido obedece a uma equação politrópica da forma $P \propto \rho^\gamma$, podemos reescrever a equação (1) sob a forma

$$\vec{\nabla} \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} + W \right) = 0 \tag{2}$$

A equação (2) pode ser integrada resultando na constância, em uma dada superfície (r, θ) , da expressão

$$\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{P}{\rho} + W \right) = C \tag{3}$$

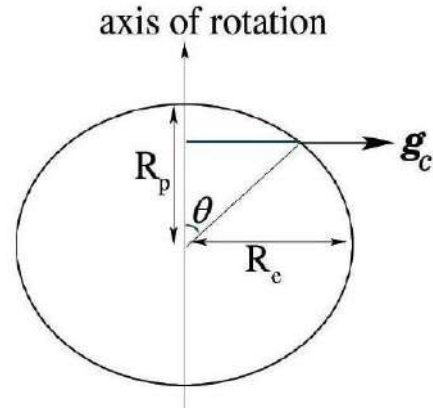


Figura 1: Esquema da superfície de um planeta achatado pelo efeito de sua rotação. R_p e R_e são, respectivamente, os raios polar e equatorial.

Em particular, a equação (3) pode ser aplicada a superfície do planeta onde as condições de contorno impõem que a pressão seja nula (efeitos de uma eventual atmosfera são desprezados). Assim, a superfície do planeta representa uma equipotencial ou, em outras palavras, devemos ter $W = C$.

A Figura 1 representa a superfície em questão do planeta, onde R_p e R_e são respectivamente os raios polar e equatorial. Representando-se a superfície equipotencial por um elipsoide (em coordenadas polares) e expandindo-se em série em termos do achatamento $f \ll 1$, a equação da superfície equipotencial é dada aproximadamente por

$$r(\theta) = R_e (1 - f \cos^2 \theta) \tag{4}$$

Por outro lado, verifica-se facilmente que, se Ω é a velocidade angular de rotação, a aceleração centrífuga pode ser decomposta em uma componente radial igual a $g_r = \Omega^2 r \sin^2 \theta$ e uma componente tangencial ao longo do meridiano igual a $g_\theta = \Omega^2 r \sin \theta \cos \theta$. Tais componentes podem ser expressas através do gradiente de um potencial “centrífugo” χ tal que $g_r = -\partial\chi/\partial r$ e $g_\theta = -(1/r)\partial\chi/\partial\theta$. Desta forma, o potencial centrífugo pode ser definido como

$$\chi(r, \theta) = -\frac{1}{2}\Omega^2 r^2 \sin^2 \theta \tag{5}$$

No que se refere ao potencial gravitacional, considerando a simetria em torno do eixo z (coincidente com o eixo de rotação), ele pode ser expresso em termos de seus multipolos, isto é,

$$V(r, \theta) = -\frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} J_n \left(\frac{R_e}{r} \right)^n P_n(\cos \theta) \tag{6}$$

onde M é a massa do planeta no interior de uma superfície $r(\theta)$, $P_n(\theta)$ são os polinômios de Legendre e os J_n são harmônicos zonais, constantes sem dimensão e definidas por

$$J_n = -\frac{3}{2\bar{\rho}} \int_0^\pi \int_0^{r(\theta)} \left(\frac{r}{R_c}\right)^{2n+2} \times \rho(r, \theta) P_n(\cos \theta) \sin \theta d\theta \frac{dr}{R_c} \quad (7)$$

onde $\bar{\rho}$ é a densidade média do corpo. Uma discussão detalhada da eq. (6) pode ser encontrada na referência [6]. Veremos mais adiante como os coeficientes zonais J_n podem ser estimados observacionalmente. Se a origem do sistema de coordenadas coincidir com o centro de massa, temos $J_0 = 1$ e $J_1 = 0$ e, em primeira aproximação, o potencial gravitacional pode ser expresso como

$$V(r, \theta) = -\frac{GM}{r} + \frac{GM R_e^2}{2r^3} J_2 (3 \cos^2 \theta - 1) \quad (8)$$

O segundo termo do lado direito da eq. (8) representa uma correção (de primeira ordem) ao potencial Newtoniano, devido a alteração da forma esférica pela rotação do corpo. Desta forma, o potencial efetivo W será dado pela soma das equações (5) e (8). A constante C que define a equipotencial na superfície pode agora ser calculada no polo definido pelas coordenadas $r = R_p$ e $\theta = 0$. Nestas condições,

$$C = \frac{GM}{R_p} - \frac{GM}{R_p} \left(\frac{R_c}{R_p}\right)^2 J_2 \quad (9)$$

Em seguida, calculando-se W no equador, definido por $r = R_e, \theta = \pi/2$ e usando-se a equação (9) obtemos

$$\frac{1}{2} \Omega^2 R_e^2 + \frac{GM}{R_e} \left(1 + \frac{J_2}{2}\right) = \frac{GM}{R_p} \left[1 - \left(\frac{R_e}{R_p}\right)^2 J_2\right] \quad (10)$$

que pode ser reescrita como

$$\frac{1}{2} \frac{\Omega^2 R_e^2 R_p}{GM} + J_2 \left(\frac{R_p}{2R_e} + \frac{R_p^2}{R_e^2}\right) = 1 - \frac{R_p}{R_e} = f \quad (11)$$

Considerando-se somente os termos de primeira ordem em f na expressão multiplicativa do segundo coeficiente zonal e lembrando que a massa

total do esferoide é $M = 4\pi\bar{\rho}R_e^2R_p/3$, podemos escrever que o achatamento de um corpo modelado por um fluido em rotação lenta é dado por

$$f = \frac{3\Omega^2}{8\pi G\bar{\rho}} + \frac{3}{2} J_2 \quad (12)$$

Esta equação será utilizada para estimar o achatamento de planetas do sistema solar sempre que o coeficiente zonal J_2 for conhecido. No caso de um corpo homogêneo, podemos estimar J_2 a partir de sua definição [eq. (7)], usando a eq. 4. Neste caso, obtemos facilmente que $J_2 = (2/5)f$ e, substituindo-se na equação acima, obtemos o resultado bem conhecido para o achatamento de um corpo fluido e homogêneo em rotação lenta, isto é

$$f = \frac{15}{16\pi} \frac{\Omega^2}{G\bar{\rho}} \quad (13)$$

3 Determinação dos coeficientes zonais do potencial terrestre

A equação (8) indica que o primeiro termo significativo da expansão em multipolos do potencial gravitacional depende de J_2 e que pode ser interpretado igualmente como uma perturbação ao potencial Newtoniano. Neste caso, um satélite (artificial) da Terra ou um planeta em torno do Sol, terão seus elementos orbitais perturbados. Em particular, o movimento secular do argumento do perigeu (ver, por exemplo, [7]). Em primeira aproximação, o avanço do perigeu (em radianos por revolução) é dado por

$$\frac{\delta\omega}{\delta t} = -3\pi \left(\frac{R_e}{a}\right)^2 J_2 \frac{\cos i}{(1 - e^2)^2} \quad (14)$$

onde i é a inclinação da órbita do satélite, e é a excentricidade e a o semieixo maior.

Façamos agora uma breve digressão histórica que nos parece relevante. Em 1957, logo após o lançamento do primeiro satélite artificial da Terra (o Sputnik I), suas passagens meridianas foram registradas no Instituto Astronômico e Geofísico da USP, graças a um rádio interferômetro instalado no campus do observatório por Luiz de Queiroz Orsini e Antônio Hélio Guerra Vieira, ambos professores da Escola Politécnica da USP e cujo objetivo inicial era o estudo da ionosfera.

Face aos resultados obtidos, não somente os registros das passagens meridianas do Sputnik I mas também, posteriormente, daqueles do Explorer I, permitiram ao professor Abrahão de Moraes, então diretor do IAG, utilizar tais informações para estimar o avanço do perigeu da órbita destes satélites artificiais, calcular os coeficientes zonais J_n e efetuar estimativas do achatamento da Terra. Os resultados foram publicados em 1959 pelos Anais da Academia Brasileira de Ciências, representando um dos primeiros trabalhos sobre perturbações orbitais devidas ao achatamento da Terra. O artigo inclui ainda soluções em termos das funções de Jacobi e de Weierstrass. Tal trabalho contribuiu enormemente a reputação internacional de Abrahão de Moraes, um dos "pais" da astronomia brasileira.

Desde então, graças ao estudo de levantamentos gravimétricos e das órbitas dos satélites artificiais, foi possível estimar-se os coeficientes zonais J_n de ordens elevadas ($n > 30$), permitindo determinar o geoide terrestre com grande precisão. Adotaremos aqui o valor $J_2 = 1,0827 \times 10^{-3}$, recomendado pela União Astronômica Internacional (UAI) na sua resolução nº 1 da Assembleia Geral de 1967 em Lucerna. Neste caso, usando-se a equação (12), própria para um modelo "fluido não-homogêneo", obtemos para o achatamento rotacional da Terra o valor $f = 1/298,25 = 0,00335289$, próximo do valor original estimado por Newton. Notar que o valor do achatamento terrestre medido através de inúmeras missões geodésicas é $f = 0,00335$, em excelente acordo com o resultado teórico esperado do modelo fluido não-homogêneo. Voltaremos a esta questão mais adiante quando modelos elásticos serão discutidos.

3.1 O achatamento rotacional do Sol

O problema do achatamento rotacional do Sol tem um interesse histórico particular, pois está relacionado com um dos testes fundamentais da teoria Geral da Relatividade de Einstein.

Nos fins do século 19 a gravitação Newtoniana encontrava-se no seu apogeu, pois o movimento dos corpos que constituem o sistema solar (planetas, asteroides, cometas, etc.) podia ser calculado com grande precisão. No entanto, havia diferenças significativas no caso do planeta Mer-

cúrio. Uma teoria detalhada da órbita deste planeta foi desenvolvida desde 1843 pelo astrônomo e matemático que previu a existência de Netuno, Urbain Jean Joseph Le Verrier. Os estudos seguintes confirmaram uma discrepância entre o valor observado para o avanço secular do perigeu de Mercúrio e as correções devidas as perturbações dos demais planetas do sistema solar. O valor observado corresponde a $574,5''/\text{século}$ enquanto as correções devidas ao demais astros é avaliada, segundo a teoria de Newton, em $531,5''/\text{século}$ (ver, por exemplo, a referência [8]). Assim, resta um resíduo da ordem de $43''/\text{século}$, motivo de discussões desde o fim do século 19 e início do século 20.

Diferentes hipóteses foram levantadas procurando explicar tal diferença como a presença de um disco de poeira nas vizinhanças das órbitas de Mercúrio e Vênus ou a existência de um planeta interior denominado Vulcano, entre a órbita de Mercúrio e o Sol. No entanto, com o advento da teoria geral da relatividade em 1915, o avanço do perigeu de Mercúrio (e dos demais planetas) pode ser explicado naturalmente, constituindo-se em um dos maiores triunfos da teoria de Einstein.

Nos anos sessenta, Brans & Dicke [9] propuseram uma teoria escalar-tensorial da gravitação, procurando incorporar o princípio de Mach no qual as forças inerciais são a consequência da distribuição da matéria localizada nos confins do universo. Neste contexto, introduziram um campo escalar responsável por tal interação. O acoplamento entre o campo escalar e o tensorial é representado pela constante de interação ω cuja intensidade se espera que seja da ordem da unidade. A teoria de Brans & Dicke prevê, igualmente, um avanço do perigeu de Mercúrio mas com um valor inferior ao da Relatividade Geral. Para explicar a diferença, Brans & Dicke sugeriram que seria devida a um achatamento do Sol, o qual teria uma rotação mais intensa no seu interior do que à observada na superfície. Utilizando a equação (14), calcula-se facilmente que o coeficiente zonal J_2 necessário para explicar o avanço do perigeu de Mercúrio por um eventual achatamento solar seria $J_2 = 1,96 \times 10^{-4}$. Medidas do achatamento solar efetuadas por Dicke, usando um sofisticado sistema fotométrico, foram contestadas na literatura devido as dificuldades em definir uma superfície equipotencial, pois a fotos-

Tabela 1: Dados dos planetas e coeficiente de achatamento observado e calculado.

Planeta	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	P (horas)	J_2	f (observado)	f (calculado)
Terra	5,513	24,00	$1,0826 \times 10^{-3}$	0.00335	0.00335
Marte	3,933	24,62	$1,9605 \times 10^{-3}$	0.00648	0.00523
Júpiter	1,323	9,93	$1,4730 \times 10^{-2}$	0,06487	0,06380
Saturno	0,687	10,75	$1,629 \times 10^{-2}$	0,09796	0,0931
Urano	1,270	-17,23	$3,510 \times 10^{-3}$	0,02293	0,0197
Netuno	1,638	16,11	$3,532 \times 10^{-3}$	0,01708	0,0181

fera depende do comprimento de onda no qual a profundidade ótica é definida.

Uma ampla revisão das medidas do achatamento solar foi apresentada em [10] e o valor atualmente aceito é $J_2 = -(2,22 \pm 0,02) \times 10^{-7}$, cerca de 3 ordens de grandeza inferior ao valor necessário para explicar o avanço observado do perigeu de Mercúrio, encerrando definitivamente a questão em favor da teoria de Einstein.

3.2 Coeficientes zonais dos demais planetas do sistema solar

A determinação dos coeficientes J_n para os planetas do sistema solar segue um procedimento similar ao descrito anteriormente, isto é, baseado nas variações seculares dos elementos orbitais e, em particular no avanço do perigeu dos satélites naturais, bem como nas variações orbitais das sondas espaciais enviadas nestas últimas décadas para estudar os planetas do sistema solar. Passagens próximas pelos planetas e seus satélites permitiram obter informações preciosas quanto aos campos gravitacionais dos mesmos.

Na tabela 1 apresenta-se um resumo dos valores do coeficiente zonal J_2 medido por tais procedimentos bem como o achatamento estimado pela equação (12), resultante de um modelo fluido não-homogêneo. Para cada planeta é dado, igualmente, sua densidade média ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) na coluna dois e o período rotacional em horas na coluna três. Os valores medidos e previstos do achatamento são igualmente listados respectivamente nas duas últimas colunas.

Existem disponíveis na literatura valores dos coeficientes zonais para vários satélites naturais, que não foram incluídos na tabela 1. Isto se justifica porque a deformação destes corpos não é

devida unicamente a rotação mas também as forças de maré entre o planeta e o satélite, como é o caso da Lua. Apenas como ilustração e facilitar o trabalho de um leitor desejoso de se aprofundar no tema, citamos as referências [11–13] para valores dos coeficientes zonais da Terra e de outros planetas do sistema solar. Para os gigantes gasosos Urano e Netuno podemos mencionar as referências [14, 15] e explicitamente para Saturno a referência [16] e [17] para Júpiter.

Uma simples inspeção da tabela 1 sugere que o modelo “fluido não-homogêneo” explica razoavelmente o achatamento observado dos planetas, embora no caso de Marte o erro é maior do que se poderia esperar. Não se pode excluir que haja ainda uma incerteza na determinação do coeficiente zonal J_2 deste planeta e/ou na compreensão de sua estrutura interna, exigindo termos adicionais para a representação do potencial gravitacional. Embora o modelo “fluido” seja o mais adequado para planetas gigantes gasosos, notamos pequenas diferenças entre os valores previstos do achatamento e os observados. Embora erros nos coeficientes zonais possam estar ainda presentes, deve-se levar em conta que a estrutura interna destes planetas é bastante complexa. Tais gigantes gasosos formam-se inicialmente a partir de um núcleo rochoso com massas entre 10 – 30 vezes a massa da Terra e, em seguida, por acreção do gás presente no disco protoplanetário [18]. No entanto, estes aspectos não serão considerados no presente artigo.

4 O modelo “elástico”

Como vimos anteriormente, o estudo da figura de equilíbrio de um corpo rígido/elástico foi mo-

tivo (e é ainda) de investigação por inúmeros pesquisadores de renome. No entanto, como veremos, modelos baseados na teoria linear da elasticidade não produzem resultados significativamente diferentes do modelo “fluido” discutido acima. No entanto, tratando-se de um texto com objetivos didáticos, apresentaremos as bases de tal modelo.

Inicialmente, é interessante procurar responder a seguinte questão: consideremos uma rocha de pequenas dimensões, dezenas de metros, por exemplo. Neste caso, tem a gravitação algum efeito no seu equilíbrio interno ou na determinação de sua forma? A resposta é certamente negativa, pois a estrutura do corpo nestas condições é determinada essencialmente por forças moleculares de origem eletromagnética. Se aplicarmos uma força externa (tração ou compressão) a distância intermolecular (ou entre os átomos) será alterada e uma energia elástica potencial é induzida. No regime linear, ou regime de Hooke, a energia potencial elástica é proporcional ao quadrado do módulo do vetor que caracteriza a deformação. Se aumentarmos, por exemplo, a tração a qual o corpo está submetido, nos afastamos do regime linear e o corpo pode sofrer uma ruptura. Um aspecto importante é que, experimentalmente, a ruptura ocorre antes do que se deveria esperar com base no valor do módulo de Young do material [19]. Para materiais diversos, a tração crítica situa-se entre (4–6)% do valor do módulo de Young. Por exemplo, uma barra de ferro ($Y = 1,6 \times 10^{12}$ dyn/cm²) sofre ruptura quando submetida a uma tração de $8,5 \times 10^9$ dyn/cm².

Com base nestas informações, podemos retomar a discussão sobre a dimensão mínima de um corpo a partir da qual a gravitação tem um papel importante na determinação de sua forma ou no seu equilíbrio interno. Para simplificar a análise, suponhamos uma rocha homogênea de forma esférica. Neste caso, um cálculo simples mostra que a pressão central causada pela gravidade é da ordem de

$$P_0 = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2 \quad (15)$$

Tal pressão não pode ser superior a tensão crítica T_c do material acima da qual ocorre a ruptura, o que permite definir um raio crítico R_c acima do qual a gravitação domina as forças moleculares

de origem eletromagnética, isto é

$$R_c = \sqrt{\left(\frac{3T_c}{2\pi G \rho^2}\right)} \quad (16)$$

Para uma rocha constituída de basalto, a tensão de ruptura é da ordem de 5×10^8 dyn/cm² e a densidade é tipicamente da ordem de $2,2$ g/cm³. Neste caso, obtemos da eq. (16) que o raio crítico é aproximadamente $R_c \sim 270$ km. Abaixo deste valor a gravitação é subdominante, o que explica as formas irregulares de asteroides com tais dimensões. Núcleos cometários são agregados de pequenas rochas constituídas pelo chamado gelo “sujo” (*dirty ice*), cuja tensão de ruptura é da ordem de 10^7 erg/cm² e uma densidade aproximada de 1 g/cm³. Neste caso, o raio crítico é $R_c \sim 85$ km. As dimensões observadas dos núcleos cometários são apenas de alguns quilômetros, indicando a predominância de forças de coesão moleculares e explicando a ruptura frequente dos núcleos por forças de maré, quando tais corpos se aproximam demasiadamente do Sol ou de Júpiter.

Feitas tais considerações, podemos retomar a questão do equilíbrio de um planeta elástico em rotação. Admitiremos novamente que a rotação não é importante e que pode ser tratada como uma perturbação do potencial gravitacional V . Nestas condições, a equação equivalente ao equilíbrio hidrostático (equação de Cauchy) é

$$\partial_k T_i^k + \rho \partial_i V = 0 \quad (17)$$

O tensor de Cauchy no limite de Hooke é dado por

$$T_{jk} = \lambda e_{nn} \delta_{jk} + 2\mu e_{jk} \quad (18)$$

onde λ e μ são as constantes de Lamé, relacionadas por $\lambda = K - (4/3)\mu$ e onde K é o coeficiente de compressibilidade do material. A tensão e_{ij} está relacionada com o vetor de deformação ζ_i pela relação

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \zeta_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \zeta_j}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

Notar que no caso incompressível temos a condição adicional $\vec{\nabla} \cdot \vec{\zeta} = 0$. A equação (17) pode ser linearizada no sentido de Love, isto é, introduzindo-se o potencial centrífugo [ver eq. (5)] como uma perturbação.

Por outro lado, a solução para o modelo “fluido” foi obtida com a condição de contorno na qual a pressão na superfície é nula, o que não necessariamente é verdade no caso de um corpo sólido em rotação como a Terra. Neste caso, a superfície pode estar submetida a uma tensão elástica (não hidrostática) T_s que pode ser representada de uma forma geral, pela expressão

$$T_s = \sigma_c \left(\frac{R}{R_c} \right)^2 \left(\frac{\Omega^2}{4\pi G\rho} - \frac{4}{15}f \right) P_2(\cos\theta) \quad (20)$$

Na equação acima σ_c define a tensão crítica próxima do valor de fratura discutido anteriormente. Para tensões T_s acima de σ_c , a superfície comporta-se como um fluido; R é o raio (médio) do planeta e R_c é o raio crítico definido pela equação (16). Isto significa que, quando $R \gg R_c$, na ausência de rotação o corpo tem uma forma esférica. Por outro lado, se a tensão T_s for inferior ao valor crítico c , a superfície vai responder de forma elástica. Para os interessados nos detalhes matemáticos, consultar a referência [20] para o cálculo do achatamento do planeta quando $T_s \ll \sigma_c$, dado pela expressão

$$f = \frac{15}{16\pi} \frac{\Omega^2}{G\rho} \frac{1}{1 + \tilde{\mu}} \quad (21)$$

onde o módulo de cisalhamento reduzido $\tilde{\mu}$ é definido pela relação

$$\tilde{\mu} = \frac{57}{8\pi} \frac{\mu}{G\rho^2 R^2} \quad (22)$$

Em geral, para os planetas do sistema solar (tanto os chamados “terrestres” como os gasosos), a tensão na superfície gerada pela rotação é superior ao valor crítico c , o que significa que o achatamento pode ser calculado com boa precisão pela equação (12). Pequenas diferenças entre os valores calculados e observados são provavelmente devidas as incertezas na estrutura interna dos planetas e nas componentes zonais do potencial gravitacional, em particular no caso dos planetas gigantes gasosos, como mencionado acima.

5 Considerações finais

A forma de um corpo (planeta) em rotação, submetido a sua gravitação, é uma questão que motivou inúmeros pensadores nestes últimos três

séculos e continua ainda como uma fonte importante de motivação científica. Com a descoberta dos exoplanetas e o desenvolvimento tecnológico da instrumentação para imageamento em alta resolução, graças a técnicas interferométricas (caso do instrumento SPHERE, em operação no ESO - European Southern Observatory), será possível no futuro, durante os trânsitos, resolver a forma dos planetas projetada na superfície da estrela e obter informações quanto ao seu achatamento. Tais observações nos fornecerão informações fundamentais quanto a rotação e a estrutura interna destes corpos.

As bases da teoria apresentadas neste artigo podem ser aplicadas a outros corpos compactos em rotação como as anãs brancas e estrelas de nêutrons, embora estas últimas necessitem de um tratamento relativístico e não Newtoniano [21]. Em todo caso, é interessante de ser mencionado que, o único pulsar (pulsar do Caranguejo) com um limite superior para seu achatamento rotacional, obtido pelo interferômetro gravitacional LIGO, é pouco deformado pois $f < 1,3 \times 10^{-4}$, enquanto a equação (13) prevê $f \sim 2,4 \times 10^{-4}$.

Referências

- [1] I. Newton, *Natural philosophy and the principles of mathematics* (University of California Press, 1966).
- [2] P. L. M. de Maupertius, *La figure de la Terre déterminée* (Académie des Sciences, 1739).
- [3] A. Love, *Some problems of geodynamics being an essay to which the Adams prize in the University of Cambridge was adjusted in 1911* (Cambridge University Press, 1963).
- [4] A. Love, *A treatise on the mathematical theory of elasticity* (Cambridge University Press, 1892).
- [5] L. Landau e E. M. Lifshitz, *Theory of elasticity* (Oxford, 1959).
- [6] O. D. Kellogg, *Foundations of potential theory*, vol. 31 (Springer Science & Business Media, 2012). Disponível em <http://eudml.org/doc/203661>, acesso em ago. 2024.

- [7] M. Lecar, J. Sorenson e A. R. Eckels, *A determination of the coefficient J of the second harmonic in the Earth's gravitational potential from the orbit of satellite 1958 β_2* , *Journal of Geophysical Research* **64**, 209 (1959), uma fórmula para o avanço do argumento do perigeu é dada como um exercício resolvido no livro “Mécanique” de L. Landau e E. M. Lifshitz, Editions de la Paix, Moscou (em francês).
- [8] B. Berche e E. Medina, *The advance of Mercury's perihelion* (2024). [ArXiv:2402.04643](#).
- [9] C. Brans e R. H. Dicke, *Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation*, *Physical Review* **124**(3), 925 (1961).
- [10] C. Damiani et al., *A brief history of the solar oblateness. A review*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **73**(2–3), 241 (2011).
- [11] A. C. M. Correia e A. Rodríguez, *On the equilibrium figure of close-in planets and satellites*, *The Astrophysical Journal* **767**(2), 128 (2013).
- [12] S. J. Peale, *The gravitational fields of the major planets*, *Space Science Reviews* **14**(3–4), 412 (1973).
- [13] C. F. Yoder, *Astrometric and Geodetic Properties of Earth and the Solar System*, in *Global Earth Physics: A Handbook of Physical Constants, volume 1* (American Geophysical Union, 1995), 1–31.
- [14] B. Wang et al., *The Neptunian gravity estimated from the motion of Triton based on astrometric observations*, *Astronomy and Astrophysics* **671**, A70 (2023).
- [15] B. A. Neuenschwander e R. Helled, *Empirical Structure Models of Uranus and Neptune*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **512**(3), 3124 (2022). [ArXiv:2203.02233](#).
- [16] L. Iess et al., *Measurement and implications of Saturn's gravity field and ring mass*, *Science* **364**, eaat2965 (2019).
- [17] D. Kong, K. Zhang e G. Schubert, *On the interpretation of the equatorially antisymmetric Jovian gravitational field*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (2017).
- [18] J. A. F. Pacheco, *Vida no universo* (Edusp, São Paulo, 2020), ver capítulo 2 - Formação do Sistema Solar, p. 55.
- [19] M. Marder e J. Fineberg, *How Things Break*, *Physics Today* **49**(9), 24 (1996).
- [20] I. de Pater e J. J. Lissauer, *Planetary Sciences* (Cambridge University Press, Cambridge, 2010), second ed.
- [21] S. Vincent e J. A. de Freitas Pacheco, *Axisymmetric Oscillations of Rotating Neutron Stars: Gravitational Wave Emission*, in *Pulsar Astronomy: Unrevealing Compact Stars with China's New Facilities*, editado por J. H. Z. Gao, R. Xu e C. Vasconcellos (World Scientific, Singapore, 2024).

Astronomia no mundo islâmico: uma perspectiva europeia

Richard Kerner

Sorbonne Université, França

Resumo

As conquistas matemáticas e astronômicas do mundo islâmico durante sua era dourada são brevemente expostas. Este artigo é baseado na palestra convidada proferida remotamente no encontro astronômico ICRANET-Isfahan, que ocorreu de 2 a 5 de novembro de 2021, que, por sua vez, reproduz partes importantes de um dos capítulos do meu livro *Our Celestial Clockwork*, publicado recentemente (2021) pela World Scientific [1].

Abstract

Mathematical and astronomical achievements of the Islamic World during its golden era are briefly exposed. This article is based on the invited talk delivered remotely at the ICRANET-Isfahan Astronomical meeting, November 2-5, 2021, which, in turn, reproduces major parts of one of the chapters of my book *Our Celestial Clockwork*, published recently (2021) by the World Scientific [1].

Palavras-chave: história da ciência, astronomia, mundo islâmico.

Keywords: history of science, astronomy, islamic world.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45445](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45445)

1 A propagação da astronomia na Idade de Ouro do Islã

No final do quinto século d.C., o Império Romano estava em ruínas. Foi dividido nas partes Ocidental e Oriental já em 395 d.C. e sujeito a crescentes invasões bárbaras desde então. O último imperador romano, Rômulo Augusto, foi eliminado em 476 d.C. pelo chefe germânico de guerra Odoaker, que se autoproclamou imperador.

A parte oriental do Império, com capital em Constantinopla, transformou-se gradualmente no Império Bizantino de língua grega. Todos estes territórios, incluindo o Egito e o Norte de África até à Espanha, eram cristãos desde que o Imperador Constantino proclamou o Cristianismo como religião oficial. No entanto, desde a queda do Império Romano Ocidental, a maior parte destes territórios foram privados de qualquer exército e de Estado organizado, se tornando propensos a invasões bárbaras, entre as quais os Hunos, os Godos e os Vândalos foram os mais importantes e desastrosos.

Em meados do século VII d.C., uma nova religião foi proclamada por Maomé na Arábia, deri-

vada das tradições judaica e cristã, simplificando-as e professando com grande convicção a singularidade de Deus. Esta foi uma revolução importante, porque substituiu a princípio tribal por uma unidade religiosa e social mais geral.

Enquanto a Europa entrou na era de turbulência e invasões da Idade das Trevas, que durou aproximadamente desde 500 d.C. até ao século XII, os árabes conquistaram vastos territórios criando uma civilização islâmica fervilhante, que se espalhou desde a Espanha mourisca, no Ocidente, através do Norte de África Ocidental, através do Egito e da Mesopotâmia, tocando a Índia e até mesmo as partes mais ocidentais da China. Durante os primeiros séculos, eles tiveram que lidar com o ainda poderoso Império Romano Oriental e com o poderoso grande Império Persa dos Sassânidas.

As principais etapas desta extraordinária aventura político-religiosa podem ser representadas da seguinte forma:

- Califas Corretamente Guiados 632-661,¹
- Expansão Omíada 661-750,

¹Califas que surgiram logo após a morte de Maomé.

- Expansão Abássida 750-1258,
- Espanha Mourisca 756 - 1162.

O único precedente de uma expansão tão rápida foi o império helenístico construído por Alexandre, o Grande. Tal como o grego e o latim antigos no Império Romano, a língua árabe tornou-se universal entre os estudiosos islâmicos, com o persa e o turco como subsidiárias no Oriente. A ciência grega antiga foi assimilada e desenvolvida ainda mais. Aristóteles, Euclides e Ptolomeu foram traduzidos e multiplicados em incontáveis exemplares. A ciência médica dos gregos antigos foi incorporada, e Hipócrates e Galeno também foram traduzidos.

A “Idade de Ouro” da civilização islâmica abrange o período do século IX ao XIII d.C. em Bagdá, sob a dinastia Abássida, e na Espanha moura até o século XIV; durou um pouco mais na Ásia Central, caindo sob a conquista mongol.

Durante os primeiros 115 anos do Califado Abássida (de 750 a 1258 dC), o Estado Islâmico viu um crescimento recorde nos campos das artes da literatura e da música, das ciências (especialmente astronomia), filosofia, matemática, medicina, cultura, comércio e indústria. O árabe, a língua do Alcorão, tornou-se a língua dos estudos internacionais. Além da capital, Bagdá, muitos centros provinciais competiam entre si. Vários termos científicos de origem árabe estão em uso na ciência ocidental até hoje e são conhecidos por todos: basta citar alguns, como álgebra, algoritmo, zênite, azimute, nadir, álcool, álcali.

Em 751 d.C., com a ajuda de alguns prisioneiros chineses, o governador abássida de Samarcanda fundou a indústria do papel. Em 800 d.C., fábricas de papel foram estabelecidas em Bagdá e Damasco; em 900 d.C., outro foi estabelecido no Cairo. Por volta de 1150 d.C., vários foram estabelecidos no Marrocos e na Espanha. Como resultado, a aprendizagem islâmica espalhou-se rapidamente pela Europa.

Em 756 d.C., Amir Abd ar-Rahman chegou ao poder na Espanha. Seu mandato também contribuiu para a Idade de Ouro Islâmica. Ele organizou um sistema de lei e justiça e gostava muito de conhecimento e aprendizagem. Acadêmicos de toda a Europa buscaram o conhecimento e o aprendizado da Espanha durante seu mandato.

As universidades islâmicas eram as únicas instituições educacionais gratuitas.

Em 830 d.C., o sétimo califa abássida, Al-Mamun, estabeleceu a famosa Casa da Sabedoria em Bagdá. A língua grega deu lugar ao árabe como forma de expressão de ideias científicas e filosóficas. A literatura grega clássica foi traduzida para o árabe e estudiosos de língua árabe escreveram vários comentários renomados.

Não é de admirar que, durante o despertar da Europa Ocidental Medieval, os estudiosos se tenham voltado primeiro para traduções árabes da ciência grega antiga. Para enriquecer a Europa cristã em estudos científicos, médicos e filosóficos, estas obras tiveram de ser vertidas ao latim. Isto foi feito principalmente na Espanha muçulmana e na Sicília e esses livros serviram como livros didáticos em universidades durante séculos.

No entanto; reconhecendo o papel crucial da Idade de Ouro Islâmica na transmissão da ciência grega antiga, não devemos esquecer o facto de que ela foi previamente conservada e transmitida pelos próprios romanos e gregos, especialmente durante o início da era cristã. As primeiras traduções para o árabe foram feitas não antes de meados do século VIII, 1.100 anos depois de Aristóteles, 1.050 anos depois de Euclides e 900 anos depois de Ptolomeu publicar seus artigos científicos em grego, que foram escritos originalmente em papiro, material relativamente frágil. Um papiro comum, especialmente se for usado para leitura frequente, não duraria mais do que alguns séculos; isso significa que os papiros dos quais os árabes traduziram os textos da filosofia e da ciência gregas foram copiados muitas vezes por gregos, romanos, judeus e cristãos siríacos durante os séculos anteriores às invasões islâmicas.

2 As fontes

A ciência islâmica teve as suas fontes em ambos os lados da sua difusão geográfica, nomeadamente na tradição científica grega conservada em Bizâncio e no Egito helenístico, ambos cristianizados há muitos séculos. As tradições matemáticas e astronômicas indianas e persas [2] são outras fontes importantes da ciência islâmica.

Os gregos devem muito do conhecimento astronômico às primeiras civilizações babilônica e

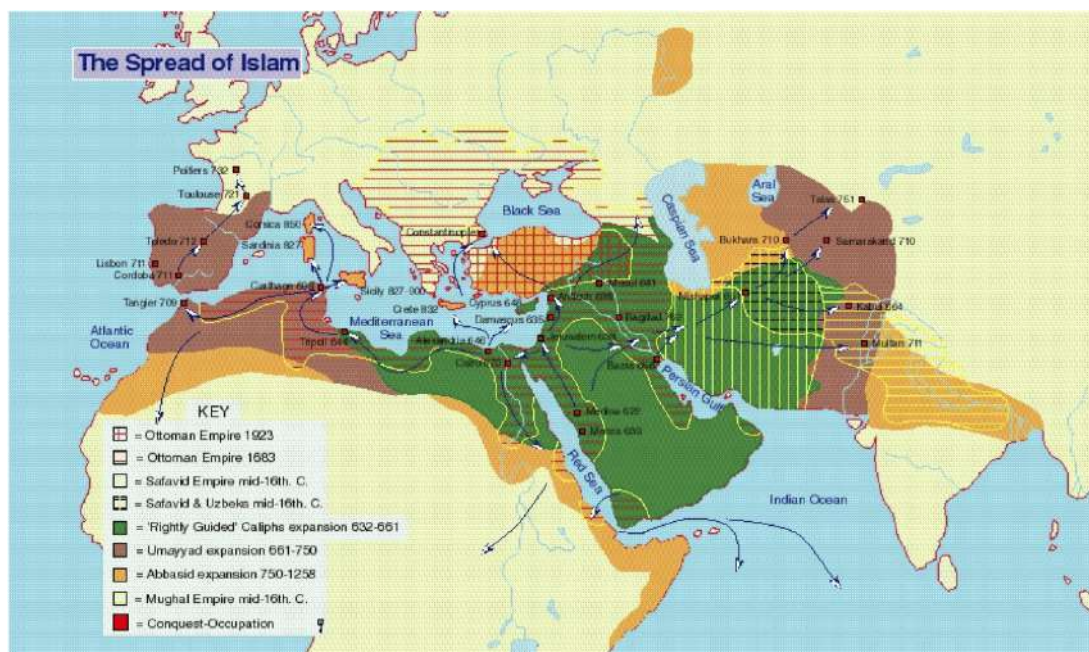


Figura 1: Expansão do Islã na Idade Média.

egípcia; no entanto, enriqueceram e ampliaram esses conhecimentos em proporções sem precedentes.

Na antiga Babilônia, as observações eram realizadas pelos caldeus do topo de construções piramidais chamadas *Zigurates*. Eles foram capazes de determinar com surpreendente precisão as coordenadas celestes de estrelas e planetas, e acompanhar os movimentos anuais do Sol e os movimentos mensais da Lua. Tal como no antigo Egito, a cronometragem era uma das suas funções mais importantes, bem como a interpretação de presságios de configurações planetárias e outros eventos celestes perceptíveis, especialmente eclipses solares e lunares, alguns dos quais eles vieram a prever com bastante sucesso devido à compreensão da chamada periodicidade *Saros*, que estabelece o período dos eclipses.

O primeiro contato do mundo islâmico com a matemática e a astronomia deveu-se às influências indianas e persas [3, 4]. Da Índia, os árabes adotaram o sistema decimal com os numerais (incluindo o zero) que usamos hoje. O principal texto matemático indiano de Brahmagupta (598 - 670 d.C.) foi traduzido muito cedo para o árabe.

Esse texto continha, entre outras, a ideia de números negativos e suas propriedades algébricas. Eles foram chamados de “dívidas”, em oposição aos números positivos chamados de “fortu-

nas”. Não só foi definida a sua adição algébrica, mas também a multiplicação, com regras bem conhecidas, incluindo o fato de que um produto de dois números negativos é um número positivo.

Brahmagupta devia muito de seu conhecimento ao seu antecessor Aryabhata (476 - 550 d.C.), devidamente chamado de “pai da matemática indiana”. Aryabhata foi sem dúvida o maior matemático e astrônomo da Índia antiga. Sua principal obra é conhecida como *Aryabhatiya*. Continha os elementos de trigonometria esférica, equações quadráticas, álgebra, trigonometria plana, somas de séries de potências e aritmética.

No lado ocidental do avanço inicial dos árabes estavam os vastos territórios do Império Romano cristianizado, herdeiro da cultura e civilização latina e grega. Os três pilares da ciência grega que foram adotados pelos polímatas árabes e islâmicos foram: Aristóteles para a física e todas as outras ciências naturais, Euclides para a geometria e Ptolomeu para a astronomia. Suas principais obras foram traduzidas, copiadas, editadas e comentadas por estudiosos muçulmanos durante os séculos seguintes.

Aristóteles assumiria o título de “Primeiro Mestre”, atestando toda a herança intelectual dos gregos, vista como um conhecimento sistemático compatível com a visão de mundo muçulmana. Juntamente com as obras do próprio Aristóteles,

os árabes traduziram uma quantidade igualmente grande de comentários que remontam à Antiguidade tardia, particularmente à Escola de Alexandria. Alguns dos textos de Platão foram traduzidos ao mesmo tempo.

Outra grande contribuição para o desenvolvimento da ciência no mundo islâmico veio da Grécia antiga através da tradução da totalidade dos livros escritos por Euclides. O grande matemático grego Euclides reuniu nos 13 livros de sua obra principal, *Os Elementos* o conhecimento geométrico elaborado por seus antecessores, Pitágoras (570 – 495 a.C.), Hipócrates de Quios (470 – 410 a.C.), Eudoxo de Cnidos (406 – 355 a.C.). O mérito de Euclides não foi apenas a sistematização de todos os fatos e teoremas geométricos conhecidos em sua época, mas, acima de tudo, a prova de que eles podem ser derivados de apenas cinco postulados.

Os *Elementos* foram copiados muitas vezes em grego em Bizâncio, e posteriormente traduzidos em siríaco. A tradução árabe do siríaco e do grego apareceu por volta de 800 d.C. sob o comando do califa Haroun al-Rachid. Em 1120, o monge inglês Adelardo de Bath traduziu o livro de Euclides do árabe para o latim.

Contudo, a matemática grega antiga era principalmente geometria, que era concebida como mais básica do que a aritmética. Na verdade, os gregos faziam uma distinção clara entre “números”, que foram reduzidos a números inteiros, frações e números racionais, e “magnitudes”, como a diagonal de um quadrado, que se provou não ser possível ser expresso como número racional (fração). O cálculo grego foi prejudicado pela ausência de um sistema de notação adequado, incluindo o conceito extremamente útil de zero, presente na matemática indiana. Os árabes conseguiram fundir as duas noções numa única, incluindo números negativos e quantidades incomensuráveis como raízes quadradas.

A astronomia, que naquela época era sinônimo de astrologia, recebeu grande importância pelos governantes muçulmanos desde o advento do Islã. A maior parte do conhecimento astronômico estava contida na *Magna Opus* de Ptolomeu, traduzida para o árabe das versões síria e grega conservadas em bibliotecas cristãs que sobreviveram à queda do Império Romano.

Cláudio Ptolomeu viveu na cidade egípcia de

Alexandria de 100 a 170 d.C. ou mesmo até 178 d.C., segundo alguns comentaristas árabes e tradutores de seus escritos. Naquela época, o Egito era uma província romana governada pela dinastia grega de mesmo nome de família, Ptolemaios.

Ptolomeu foi o último grande representante da ciência grega, herdeiro de uma tradição de oito séculos. Ptolomeu viveu e trabalhou 400 anos depois de Euclides, 600 anos depois de Péricles e 700 anos depois de Anaximandro de Mileto, que foi o primeiro a sugerir a ideia da esfera celeste e a produzir um mapa do mundo habitado conhecido em sua época. Pouco se sabe sobre a vida de Ptolomeu, exceto que ele provavelmente ela se passou em Alexandria, onde observou dois eclipses solares: um no nono ano do governo de Adriano (125 d.C.) e no quarto ano do governo de Antonino (141 d.C.). Além de seu *Syntaxis Mathematicus*, conhecido também como *Magnum Opus* devido à sua importância para a astronomia, e principalmente sob o nome de sua tradução árabe *Almagesto*. Ptolomeu também foi um geógrafo renomado em sua época.

O sistema geocêntrico elaborado na *Syntaxis* foi universalmente aceito durante a antiguidade helênica e romana, e mais tarde pelas civilizações medievais cristã e muçulmana, e foi usado para descrever e prever movimentos de corpos celestes por astrônomos e astrólogos.

3 A ciência islâmica e seus representantes

A matemática e a astronomia no mundo islâmico desenvolveram-se num contexto mais amplo de evolução cultural, filosófico, religioso e científico, devido a notáveis pensadores, médicos e polímatas, entre os quais os maiores foram os seguintes:

- Al-Farabi, (? - 950), conhecido no mundo cristão pelo nome latinizado Alfarabius. Ele passou a maior parte de sua vida em Bagdá. Escritor prolífico, foi autor de comentários sobre a filosofia platônica e aristotélica e de obras originais sobre física, alquimia, psicologia, astronomia e música. Sua autoridade era tão grande no mundo islâmico, que ele foi frequentemente chamado de “O Segundo Mestre” – significando o segundo depois de Aristóteles. Seus comentários abriram caminho para a síntese filosófica

de Ibn Sina (Avicena) e Ibn Rushd (Averróis). Nos últimos anos de sua vida, mudou-se para Damasco, onde morreu em 950 e.C..

- Avicena (Ibn Sina), (? - 1037), renomado médico e filósofo, chamado “O Terceiro Mestre”. A sua obra mais apreciada foi o *Cânone da Medicina*, um manual de ciência médica em vários volumes, que se tornou autoridade para os médicos europeus depois de ter sido traduzido para o latim. Entre suas contribuições duradouras estava o método de teste de drogas e a descoberta da infecciosidade da tuberculose.
- Averróis (Ibn Rushd), (1126 - 1198). Considerado um dos maiores cientistas muçulmanos, nasceu na Andaluzia, então governada pela dinastia almorávida, mais tarde passada sob o domínio dos almóadas. Estudou diligentemente os escritos de Aristóteles, Al-Farabi e Ibn-Sina (Avicena). Tornou-se o cientista islâmico mais influente entre os europeus; seus escritos foram estudados em Pádua, Salamanca, Oxford e Sorbonne. Averróis é acusado de heresia e banido primeiro de Córdoba, depois da Andaluzia para Marrocos; seus livros são queimados e proibidos. Embora parcialmente perdoado, ele morreu no Marrocos, nunca tendo sido autorizado a retornar à sua cidade natal, Córdoba.
- Omar Khayyam (1048 - 1131), um renomado matemático, astrônomo, filósofo e poeta. Nasceu em Nishapur, de origem persa, recebeu uma excelente educação na sua terra natal, Nishapur, e depois mudou-se para Samarcanda (actual Uzbequistão). Sua reputação matemática repousa principalmente em seu *Tratado sobre Demonstração de Problemas de Álgebra*. Ele conquistou tal nome que o sultão selêucida Malik-Shah o convidou a ir a Isfahan para realizar as observações astronômicas necessárias à reforma do calendário. Para isso foi construído ali um observatório e produzido um novo calendário, conhecido como *calendário Jalali*. Com base em 8 de cada 33 anos bissextos, era mais preciso do que o atual calendário gregoriano e foi adotado em 1075 por Malik-Shah. Seus anos em Isfahan foram muito produtivos, mas após a morte de seu patrono em 1092 ele caiu em desgraça e retornou a Nishapur, onde ensi-

nou e serviu na corte como astrólogo. A fama de Omar no Ocidente reside na coleção de *robaiyat*, ou quadras, atribuídas a ele



Figura 2: Painel superior: Astrolábio antigo, Toledo 1067 d.C.; painel inferior: Esfera armilar de Damasco, 1120.

4 Matemáticas

Uma das afirmações mais repetidas é que os muçulmanos inventaram a álgebra. Isto é em grande parte verdade, mesmo que a álgebra tenha origem inicialmente na matemática grega e indiana antiga. A palavra “álgebra” vem do árabe “al-jabr” e significa “restaurar” ou “juntar partes”. Foi cunhado pelo matemático e astrônomo persa Al-Khwarizmi (ca. 780 - ca. 850 d.C.) que viveu em Bagdá, em seu tratado *ilm al-jabr wa al-muqabala*, que significa *Ciência de juntar peças e equilibrar*. Em termos algébricos modernos, a primeira palavra referia-se à possibilidade de substituir termos de um lado de uma equação por outro,

e adicionar ou subtrair a mesma quantidade de ambos os lados. O nome de Al-Kwarizmi refere-se à cidade de Khorezm (hoje no Uzbequistão) e era conhecido no Ocidente em sua versão latinizada Alkorizm ou Algoritmo, e se tornou o nome de uma prescrição geral em matemática.

O livro de Al Khwarizmi continha muitos exemplos de como resolver problemas envolvendo comércio, herança, casamento e resgate de escravos. Os exemplos ainda não envolviam nenhum símbolo algébrico, utilizando figuras geométricas modelando as relações entre números. Mas noutros tratados matemáticos árabes, os símbolos, os números e as palavras tendiam a substituir as construções geométricas. Esta foi uma grande revolução na matemática, com enorme impacto no seu desenvolvimento futuro.

Para os matemáticos da Grécia antiga existia uma grande diferença entre números e magnitudes, os segundos significando comprimentos, áreas ou volumes. Os números foram usados, desde que pudessem ser expressos como números inteiros ou suas proporções, ou seja, frações. Essas quantidades foram chamadas de “números racionais”, em contraste com os “números irracionais”, que poderiam ser construídos geometricamente, mas não algebricamente, como a mais famosa raiz quadrada de 2, que é simplesmente a diagonal de um quadrado unitário, mas não existe uma fração cujo quadrado seria igual a 2.

A nova abordagem da matemática tornou possíveis provas simples e elegantes no lugar de construções geométricas sofisticadas. Por exemplo, enquanto o conhecido teorema geométrico diz que a área de um quadrado com lados $a + b$ é igual à área de um quadrado com lado a mais a área de outro quadrado com lado b mais a área de dois retângulos de lados a e b , esta relação *pode ser provada sem esforço através de outra fórmula*: a área de um retângulo com lados $(a + b)$ e $(a - b)$ (com $a > b$) é igual a a diferença entre as áreas dos quadrados com lados a e b , ou seja, $(a + b) \cdot (a - b) = a^2 - b^2$, o que necessita de uma construção geométrica mais sofisticada. Entre as deficiências da abordagem puramente geométrica do antigo dos gregos foi a falta de interesse na possibilidade de números negativos e operações aritméticas envolvendo entidades negativas, que eram conhecidas na China antiga desde 300 a.C. Os matemáticos islâmicos não apenas incorpora-

ram os números negativos nas operações algébricas, mas também passaram a tratar os números racionais e irracionais em pé de igualdade, não fazendo distinção na hora de somar, subtrair ou multiplicá-los.

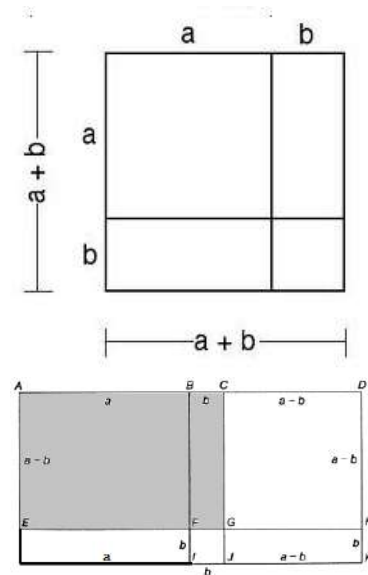


Figura 3: Derivação de fórmulas algébricas dos gregos antigos $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$ (em cima) e $(a+b) \cdot (a-b) = a(a+b) - ab - b^2 = a^2 - b^2$ (embaixo).

A vantagem da abordagem algébrica é que ela pode ser facilmente generalizada além de sua utilidade na descrição de construções geométricas em duas e três dimensões. No entanto, a maioria dos autores muçulmanos não considerou os números negativos em pé de igualdade com os positivos. Sabiam resolver equações lineares e quadráticas, mas sempre que havia uma solução negativa, rejeitavam-na como “absurda”.

Um importante avanço devido aos matemáticos muçulmanos é o estabelecimento de novos algoritmos aritméticos: a extensão dos procedimentos de extração de raízes, conhecidos pelos hindus e gregos apenas para raízes quadradas e cúbicas, para raízes de maior grau e pela extensão de o sistema decimal hindu para números inteiros inclui frações decimais como dispositivos computacionais. Omar Khayyam (1148 - 1131 d.C.), matemático, filósofo, astrônomo e poeta persa (lembrado mais por sua bela poesia do que por realizações matemáticas) considerou o problema geral de extrair raízes de qualquer grau desejado. Ele também abordou de perto a solução geral de equações cúbicas e elaborou uma abordagem uni-

ficadora para geometria e álgebra.

Os algebristas islâmicos do século X fizeram um progresso substancial, generalizando os polinômios quadráticos de Al-Khwarizmi para a álgebra de expressões envolvendo potências integrais positivas ou negativas arbitrárias do desconhecido. Vários algebristas enfatizaram explicitamente a analogia entre as regras para trabalhar com potências da incógnita em álgebra e aquelas para trabalhar com potências de 10 em aritmética.

Progresso semelhante foi feito na geometria. Os matemáticos islâmicos Thabit ibn Qurrah (836 - 901), seu neto Ibrahim ibn Sinan (909 - 946), Abu Sahl al-Kuhi (falecido por volta de 995), e Ibn al-Haytham (965 - 1040), conhecido na Europa como Alhazen, resolveram problemas envolvendo a geometria de seções cônicas, incluindo o cálculo de áreas e volumes de figuras planas e sólidas formadas deles. Também investigaram as propriedades ópticas de espelhos feitos de seções cônicas, que se tornaram de crucial importância séculos depois, para a construção de dispositivos ópticos.

5 Astronomia

Durante a “Era de Ouro do Islã”, a astronomia era uma das ciências mais importantes [5, 6]. A religião muçulmana impôs vários requisitos que exigiam importantes competências astronômicas para melhorar a cronometragem e a orientação espacial. Horário exato de cinco orações obrigatórias por dia, início e fim do jejum durante o mês sagrado do Ramadã, ligado ao primeiro e último crescente da Lua, estabelecendo horários de feriados islâmicos - tudo isso criou a necessidade de observações astronômicas.

As mesquitas recém-construídas tinham de ser orientadas para Meca, na Península Arábica, e por isso deveriam ser posicionadas por um muçulmano durante a sua oração - só isso também exigia um melhor conhecimento geográfico e astronômico.

Finalmente, vastos territórios do Islã, com um próspero comércio terrestre e marítimo, tornaram necessário o surgimento da astronomia prática, melhorando dispositivos de observação como sextantes e astrolábios, para serem usados em terra ou em mar aberto.

A astronomia tornou-se a principal entre as ciências em que os estudiosos muçulmanos se des-

tacaram. O sucesso foi construído com base no domínio da matemática - da geometria em particular -, bem como da herança filosófica dos antigos gregos e de outras civilizações antigas através da tradução para o árabe. Os observatórios fundados nos centros de aprendizagem mais importantes, como Bagdá e Cairo, exigiam instrumentos especializados para observação e instrução. Estes incluíam globos celestes, quadrantes e esferas armilares, mas o instrumento mais sofisticado adotado e desenvolvido pelos astrônomos muçulmanos foi o astrolábio.

O quão grande foi o impacto dos árabes na astronomia europeia que assumiu a liderança após o século XVI pode ser facilmente visto em qualquer atlas estelar moderno. Aqui estão algumas das estrelas brilhantes mais conhecidas cujos nomes são de origem árabe:

- Aldebaran, α Tauri, do árabe al-Dabaran, o “Seguidor”;
- Algol, β Persei, do árabe al Ghoul, o “Demônio”, ou “Monstro assustador”; (Chamado assim provavelmente porque seu piscar periódico em questão de horas pode ser facilmente visto a olho nu).
- Altair, α Aquilae, do árabe an-Nisr ut-Ta'ir, a “águia voadora”;
- Betelgeuse, α Orionis, do árabe Yad al Jawza, a “Mão de Al-Jawza”, um personagem mítico;
- Deneb, α Cygni, do árabe Dhaneb ud-Djadjab, “rabo de galinha”;
- Dubhe, α Ursae Majoris, do árabe Dubb, “Urso”;
- Fomalhaut, α Piscis Austrini, do árabe Fum al-Hul, a “Boca da Baleia”.

Os astrônomos árabes continuaram as observações usando as técnicas herdadas dos gregos e incorporando outras tradições antigas, por ex. da Pérsia e da Índia. Muitas vezes conseguiram melhorar e enriquecer os dados recolhidos por Ptolomeu no seu *Almagesto*. Um exemplo: seguindo Hiparco, Ptolomeu estimou a precessão dos equinócios em 1° por 100 anos, o que corresponderia a completar o ciclo completo em 36.000 anos. O astrônomo egípcio Ibn Yunus (850 - 1009 d.C.) corrigiu esta estimativa, reduzindo-a para 1° em

70 anos, o que corresponde ao ciclo completo de 25.200 anos, muito próximo do valor atualmente aceito. Apresentamos os astrônomos mais notáveis e suas contribuições.

- Al-Khwarizmi (ca. 786 - 850 d.C.), de origem persa, foi nomeado por Al-Mamoun, filho de Harun-al-Rashid da dinastia Abássida, como astrônomo-chefe e chefe da biblioteca da “Casa de Sabedoria” em Bagdá.

Os avanços importantes de Al-Khwarizmi na astronomia e geografia incluem a medição do comprimento de um grau de um meridiano na planície de Sinjar, melhorando a avaliação da circunferência da Terra por Erastótenes, a criação de um mapa mundial baseado na geografia de Ptolomeu, fornecendo coordenadas precisas de aproximadamente 2.400 locais no mundo conhecido. Esses resultados foram contidos em seu livro *Kitab surat al-ard* (*A Imagem da Terra*). Outro tratado de Al-Khwarizmi que entrou para o cânone ocidental dos estudos matemáticos foi uma compilação de tabelas astronômicas, incluindo uma tabela de senos, e foi traduzido para o latim. Ele também produziu dois tratados sobre o relógio de sol, sobre o astrolábio e um sobre o calendário judaico. Por volta de 1110, o inglês Roberto de Chester, que então estava na Espanha, traduziu para o latim *Al-Jabr (Álgebra)* de Al-Khwarizmi e introduziu na Europa os algarismos arábicos, incluindo o algarismo zero, que os próprios árabes haviam tomado emprestado dos matemáticos indianos.

- Al-Battani (falecido em 929), conhecido na Europa como Albategni ou Albatenius, foi o autor das *Tabelas sabianas (Al-Zij al-Sabi)*, obra que teve grande impacto nos seus sucessores muçulmanos e cristãos. Suas tabelas aprimoradas das órbitas do Sol e da Lua incluem sua descoberta de que a direção do excêntrico do Sol, conforme registrado por Ptolomeu, estava mudando. Isto, na astronomia moderna, significa que a linha de absides da Terra está se movendo lentamente. Ele também trabalhou na cronometragem das luas novas, na duração do ano solar e sideral, na previsão de eclipses e no fenômeno da paralaxe.

Al-Battani também foi um pioneiro no campo da trigonometria. Ele foi um dos primeiros, se não o primeiro, a usar razões trigonométricas

como as conhecemos hoje. Durante o mesmo período, Yahya Ibn Abi Mansour revisou completamente o *Zij (tabelas)* do *Almagesto* após observações e testes meticulosos produzindo o famoso *al-Zij al Mumtahan (o Zij validado)*. Em al-Zij al-Sabi (conhecida como *Tabelas sabianas*), Al-Battani traçou a órbita do Sol com mais precisão do que Ptolomeu. No seu *Revolucionibus*, Copérnico refere-se aos cálculos de Al-Battani nada menos que 23 vezes.

- Pertencente à mesma época, Abd-al Rahman al-Sufi (903 - 986) fez várias observações sobre a obliquidade da eclíptica e o movimento do Sol (ou a duração do ano solar). Tornou-se conhecido pelas suas observações e descrições das estrelas, das suas posições, do seu brilho e da sua cor, expondo os seus resultados constelação por constelação. Para cada constelação, ele forneceu dois desenhos, um do lado de fora de um globo celeste e outro do interior (visto do céu). Al-Sufi também escreveu comentários sobre o astrolábio, encontrando numerosos usos adicionais para ele (incluindo a localização de um dado objeto, medição de distâncias e alturas, etc.).
- O astrônomo egípcio Ibn Yunus (falecido em 1009), nos seus esforços de observação incluiu, entre outros, mais de 10.000 registros da posição do Sol ao longo dos anos, utilizando um grande astrolábio com cerca de 1,4 m de diâmetro. Sua obra, em edição francesa, foi séculos mais tarde uma inspiração para Laplace em sua determinação da *Obliquidade da Eclíptica* e das *Desigualdades de Júpiter e Saturno*.

O famoso astrônomo europeu Newcomb também usou suas observações de eclipses nos movimentos da Lua.

- Al-Biruni (973 - 1050) afirmou que a Terra girava em torno do seu próprio eixo. Ele calculou a circunferência da Terra e fixou cientificamente a direção de Meca a partir de qualquer ponto do globo. Al-Biruni escreveu um total de 150 obras, incluindo 35 tratados sobre astronomia pura, dos quais apenas seis sobreviveram. Além disso, no final do século X, Abu-al-Wafa e o príncipe Abu Nasr Mansur declararam e provaram teoremas de geometria plana e esférica que poderiam ser aplicados por astrônomos e

geógrafos, incluindo as leis dos senos e tangentes. Al-Biruni foi aluno de Abu Nasr; ele produziu uma vasta quantidade de trabalhos de alta qualidade e foi um dos mestres na aplicação desses teoremas à astronomia e a problemas de geografia matemática como a determinação de latitudes e longitudes, as distâncias entre cidades e a direção de uma cidade a outra.

- Al-Farghani foi um dos astrônomos do califa Al-Mamun. Ele escreveu sobre o astrolábio, explicando a teoria matemática por trás do instrumento e corrigindo construções geométricas defeituosas do disco central, então vigentes. Seu livro mais famoso sobre cosmografia, *Kitab Harakat Al-Samawiyah wa Jaamai Ilm al-Nujum*, contém trinta capítulos incluindo uma descrição da parte habitada da Terra, seu tamanho, as distâncias dos corpos celestes da Terra e seus tamanhos, bem como outros fenômenos.
- Al-Zarqali (Arzachel) (1029 - 1087) preparou as *Tabelas toledanas* e também foi um renomado fabricante de instrumentos que construiu um astrolábio mais sofisticado: um safiha, acompanhado de um tratado explicando como usá-lo.
- Jabir Ibn Aflah (falecido em 1145) foi o primeiro a projetar uma esfera celeste portátil para medir e explicar os movimentos de objetos celestes. Jabir é especialmente conhecido por seu trabalho em trigonometria esférica. A obra de Al-Bitruji, *Kitab-al-Hay'ah*, foi traduzida por Michael Scot, radicado na Sicília, e teve considerável influência depois disso.
- Nur ad-Din al-Bitruji (ca. 1150 - 1200 d.C.), conhecido na Europa como Alpetragius, é o autor de *Kitab fi al-haya, Um Livro de Cosmologia*. Ele viveu na Espanha mourisca, na Andaluzia, no final da Idade de Ouro Islâmica. Provavelmente foi discípulo do astrônomo Ibn Tufayl. O problema enfrentado por al-Bitruji foi o enfrentado por todos os aristotélicos que liam o *Almagesto* de Ptolomeu. Aristóteles afirmou claramente que os planetas devem se mover com movimentos circulares e deu a entender que o centro desses movimentos deve ser idêntico ao centro da Terra. Ele ainda desejava

um mecanismo para transferir o movimento do motor principal para as esferas planetárias.

Al-Bitruji seguiu a sugestão de Ibn Tufayl, assim como o outro aluno deste último, Averróis, e tentou ajustar a solução aristotélica de tal forma que correspondesse à realidade observada. A tentativa falhou devido à inadequação inerente do sistema homocêntrico para descrever os fenômenos.

- Al-Tusi (1201 - 1274), foi o último grande astrônomo da Idade de Ouro Islâmica, e sem exagero pode receber o título de “Hiparco da Astronomia Islâmica”. De origem persa, estudou em sua cidade natal, Tus, depois na cidade vizinha de Nishapur, formando-se em filosofia, medicina e matemática. Já em Nishapur al-Tusi adquiriu a reputação de um notável estudioso e tornou-se membro da Corte Ismaili a convite do governante xiita Abd ar-Rahman.

Al-Tusi permaneceu e trabalhou no castelo de Alamut até que ele caiu nas mãos do neto de Gengis Khan, Hulagu. A reputação de Al-Tusi era tão grande que Hulagu o nomeou seu próprio conselheiro e o levou para Bagdá, que foi conquistada pelos mongóis em 1258. Hulagu fez de Maragheh (no noroeste do Irã) sua capital, e o Observatório de mesmo nome foi construído lá.

Al-Tusi é mais conhecido por sua decomposição geométrica do movimento linear em uma soma de dois movimentos circulares, chamada de “casal Tusi”, quebrando a visão aristotélica estabelecida sobre a exclusividade dos movimentos circulares no céu. A mesma construção foi usada por Copérnico 250 anos depois, provavelmente reinventada de forma independente.

Al-Tusi publicou as *Tabelas Ilkhanic*, relatando suas observações astronômicas feitas durante 12 anos. Usando suas descobertas geométricas, ele melhorou substancialmente o modelo do movimento lunar. Ele também determinou o valor quase exato da precessão dos equinócios, estabelecendo-o em 51' por século. O comentário sobre o *Almagesto* continha excelentes tabelas trigonométricas com valores de arcos calculados em três casas sexagesimais para cada meio grau de argumento.

- Ibn al-Shatir (1394 a 1375) foi um proeminente

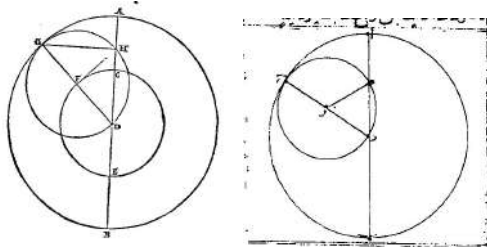


Figura 4: Esquerda: o “casal Tusi”, de suas *Memórias sobre Astronomia*, Direita: a mesma construção de *De Revolutionibus* de Copérnico, 250 anos depois.

astrônomo e matemático em Damasco, durante sua vida sob o governo da dinastia Umayyad. Depois de completar os estudos no Cairo e Alexandria, foi nomeado muwaqqit (o que marca o tempo para as preces) na grande mesquita Umayyad. Seu livro mais importante foi um tratado astronômico intitulado *A Questão Final sobre a Retificação dos Princípios* que contém novos modelos lunares, solares e planetários, afastando-se seriamente do esquema ptolomaico, embora em princípio firmemente geocêntrico.

Ibn al-Shatir não estava preocupado em aderir aos princípios teóricos da filosofia natural ou da cosmologia aristotélica, mas sim em produzir um modelo que fosse consistente com as observações empíricas. Sua preocupação com a precisão da observação o levou a eliminar os epiciclos do modelo solar ptolomaico e todos os excêntricos, epiciclos e equantes no modelo lunar ptolomaico. O novo modelo planetário de Shatir consistia em novos epiciclos secundários em vez de equantes, que melhoraram o modelo ptolomaico.

6 Observatórios islâmicos medievais

6.1 Observatório Maragha

Na época do declínio da ciência no Islã medieval, quando Bagdá deixou de ser o centro cultural florescente depois que os mongóis a saquearam em 1258, encerrando assim o reinado dos Abássidas, uma nova instituição influente chamada *Observatório de Maragha* foi criada em norte da Pérsia sob o patrocínio de Hulagu, neto de Gengis Khan. Hulagu nomeou Nasir al-Din Tusi (1201 - 1274) para ser o diretor do Observatório e também seu conselheiro pessoal. O complexo Ma-

ragha foi muito mais do que um simples observatório astronômico: tornou-se um centro único de investigação científica, dotado de uma biblioteca com mais de 100 000 volumes, sendo o edifício principal rodeado de edifícios auxiliares, incluindo alojamentos para visitantes. Astrônomos e matemáticos de todas as partes do vasto mundo islâmico participaram na concepção e construção de instrumentos astronômicos, muitos dos quais eram invenções genuinamente novas. Al Tusi nomeou Mu'ayyad al-Din al-Urdi (que morreu em 1266) como astrônomo-chefe e projetista de instrumentos.

Um tratado anônimo em persa chamado *Al-Risala al-Ghazaniyya fi'l-alat al-ra-adiyya*, o *Tratado de Ghazan* (ou *Ghazanid*) sobre os instrumentos observacionais, descreve a estrutura, construção e funções de doze “novos” instrumentos do período medieval que parecem ter sido propostos e inventados durante o reinado de Ghazan Khan, o sétimo Ilkhan da dinastia Ilkhanid do Irã, de 1295 a 1304.

Essas fontes históricas primárias podem conter notas e afirmações interessantes relativas às atividades astronômicas de Ghazan Khan e especialmente ao novo observatório que ele fundou em Tabriz. O facto é que actualmente quase não existem relatos sólidos e historicamente fiáveis sobre as atividades do Observatório de Maragha a partir de cerca de 1280.

O equipamento astronômico de Maragha incluía um quadrante mural com raio de 40 metros, uma armila solsticial, um anel de azimute, uma régua paralática (chamada “triquetrum”, régua paralática em latim) e uma esfera armilar com raio de cerca de 160 cm.

O Observatório Maragha representou um novo período de atividades científicas no mundo islâmico em meados do século XIII. Vários sistemas sofisticados pré-copernicanos, mas não ptolomaicos, foram ali elaborados, explicando os movimentos planetários com maior precisão do que os antigos astrônomos gregos. conseguiram produzir. Vários observatórios na Pérsia, Ásia Menor e Ásia Central foram construídos com Maragha servindo de modelo.



Figura 5: Um dos raros vestígios encontrados no local do antigo observatório de Maragha. O enorme círculo de concreto serviu como fundação de um dos enormes instrumentos astronômicos.

6.1.1 *Ulugh Beg e o Observatório de Samarcanda*

Ulugh Beg nasceu no norte do Irã em 1394 como o filho mais velho de Shahrukh, um dos filhos de Tamerlão. Quando jovem príncipe, ele foi designado para governar a vasta província da Transoxânia (hoje no Uzbequistão). Assumiu todas as suas responsabilidades em 1411, embora continuasse subordinado ao seu pai, que governava o império a partir de Herat (hoje no Afeganistão). Após a morte de seu pai em 1447, Ulugh Beg o sucedeu, mas sobreviveu apenas dois anos como governante independente antes de ser deposto e decapitado por seu próprio filho em 1449.

Ele é lembrado principalmente por suas extraordinárias realizações em astronomia e pela construção do maior e mais moderno observatório astronômico, uma Madrasa (escola islâmica), uma escola secundária, uma biblioteca e um centro de pesquisa combinados. O primeiro diretor do observatório de Ulugh Beg foi Qazizadeh Rumi, natural da Anatólia, que também foi um dos professores de Ulugh Beg. Após a morte de seu mestre, ele deixou Samarcanda e foi para Istambul, seguido por outros astrônomos empregados na Madrasa.

O observatório de Ulugh-Beg foi construído de 1420 a 1430 em uma colina ao norte de Samarcanda e funcionou até sua morte em 1447. Sua lo-

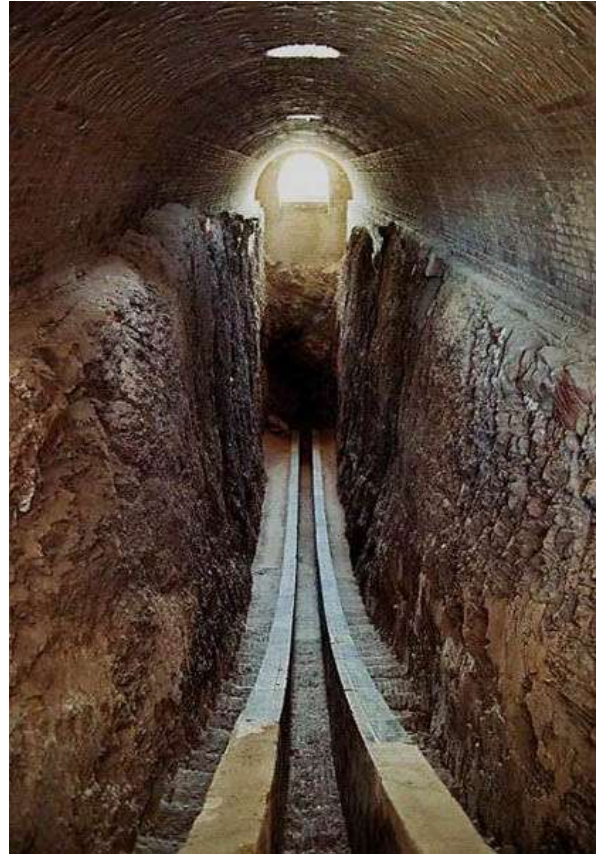


Figura 6: Grande Quadrante do Observatório de Ulugh Beg.

calização exata é desconhecida, porque foi quase completamente destruído algumas gerações após sua morte. Ulugh Beg construiu o maior sextante mural (ou melhor, poderia ter sido um quadrante) no século XV, que tinha um raio de 40,4 metros. Ele se inspirou no primeiro sextante mural conhecido, construído em Ray, no Irã, por Abu-Mahmud al-Khujandi em 994, para medir a obliquidade da eclíptica.

Instalado no prédio principal, possuía um arco bem construído com uma escada em cada lado para dar acesso aos astrônomos que realizavam as medições (Figura 6). Teria sido usado para medir o ângulo de elevação dos principais corpos celestes, especialmente na época dos solstícios de inverno e verão. A luz do corpo dado, passando por uma abertura controlada, teria brilhado na pista curva, que estava marcada com muita precisão com graus e minutos. Objetos mais fracos foram observados diretamente e o ângulo de elevação relatado ao sextante. Viajantes e cientistas que visitaram Samarcanda e o observatório des-

creveram muitos instrumentos astronômicos que foram perdidos posteriormente. Existiam diversas esferas armilares de diversos tamanhos e enormes astrolábios, entre outros.

Ulugh Beg foi certamente o astrônomo observacional mais importante do século XV. A obliquidade da eclíptica medida por seus astrônomos era quase perfeita, uma discrepância de meio minuto com o que sabemos atualmente.

Seus instrumentos astronômicos montados permanentemente foram os primeiros do gênero no mundo, e foi sua posição firme que garantiu maior precisão de observação. Entre suas grandes conquistas estava o catálogo estelar contendo mais de mil estrelas (1018 precisamente), com coordenadas exatas atribuídas a cada uma delas.

A obra-prima de Ulugh-Beg, *Cronologia*, foi traduzida para o latim e editada na Europa em 1650, e a publicação de suas tabelas estelares ocorreu em 1675. A determinação da obliquidade da eclíptica foi muito melhor do que as de Hiparco e Ptolomeu. Suas observações de planetas permaneceram insuperáveis até as de Tycho Brahe, mais de um século depois.

7 Observações finais

Tal como Bernard Lewis (1916 - 2018) afirmou no seu livro *O que correu mal?* [7], durante muitos séculos o mundo do Islã esteve na vanguarda da civilização e das realizações humanas. No entanto, devido a muitos factores interiores e exteriores, a ciência islâmica interrompeu o seu desenvolvimento por volta do século XV; desde então, a ciência europeia assumiu a liderança.

Olhando para trás, para o nosso breve resumo da história da ciência islâmica, podemos facilmente perceber a grande diferença qualitativa entre as suas realizações na matemática e em todos os outros domínios. Na verdade, foi na matemática que os árabes e os persas produziram um verdadeiro avanço ao adoptarem o sistema indiano de notação e cálculo e ao fundirem geometria e álgebra. Isto abriu caminho para o próximo avanço revolucionário realizado pelos europeus, que ampliaram o âmbito da álgebra e descobriram números complexos. Isto não poderia ser alcançado sem a base algébrica liderada pelos polímatas islâmicos.

Por outro lado, com todas as suas realizações notáveis, a Astronomia Árabe e Islâmica, espe-

cialmente no campo observacional, representa o último capítulo da ciência da Antiguidade, uma extensão natural da Babilónia; Heranças científicas indianas, e sobretudo gregas, de um pequeno mundo centrado na Terra, para o qual a esfera de estrelas fixas representava o limite externo máximo.

A ciência moderna germinou no novo quadro universitário da Europa Medieval entre os séculos XIII e XV, nascido abertamente com a revolução intelectual trazida por Copérnico no século XVI, prosseguida mais tarde por Galileu, Descartes, Kepler, Leibniz, Newton e outros europeus. Luminares científicos.

Sobre o autor

Richard Kerner (richard.kerner@sorbonne-universite.fr) é professor na Sorbonne Université, Paris, França. Tem mais de 200 artigos científicos publicados, além de livros sobre a Relatividade Restrita, Matéria Condensada e Astronomia. Seus interesses científicos se concentram também em física-matemática e cosmologia.

Referências

- [1] R. Kerner, *Our Celestial Clockwork: From Ancient Origins to Modern Astronomy of the Solar System* (World Scientific, 2019).
- [2] G. Saliba, *Islamic Science and the Making of the European Renaissance* (The MIT Press, 2007).
- [3] J. Berggren, *Episodes in the Mathematics of Medieval Islam* (Springer New York, 2016).
- [4] V. J. Katz, *A History of Mathematics: An Introduction*, Katz Series (Addison-Wesley, 2009), 2^a ed.
- [5] G. Saliba, *A History of Arabic Astronomy: Planetary Theories During the Golden Age of Islam* (NYU Press, 1994).
- [6] S. P. Blake, *Astronomy and Astrology in the Islamic World* (Edinburgh University Press, 2016).
- [7] B. Lewis, *What Went Wrong?: Western Impact and Middle Eastern Response* (Oxford University Press, 2002).

Alinhamento automático de imagens do disco solar e determinação precisa de coordenadas heliográficas de manchas solares com PySDIA

Cicero Dário Grangeiro¹, Tharcísyo Sá e Sousa Duarte¹, Jefferson Soares Da Costa² e Hugo Rodrigues Coelho²

¹Universidade Federal do Cariri

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo

Este trabalho apresenta o PySDIA (Python Solar Disc Image Alignment), um código Python automatizado para alinhamento e correção rotacional de imagens de discos solares capturadas com telescópios de pequena abertura. Aplicamos o PySDIA a um conjunto de 101 imagens próprias, abrangendo o período de 8 de novembro de 2022 a 4 de dezembro de 2023, para caracterizar e extrair coordenadas heliográficas de 250 manchas solares. Para validar nossos resultados, comparamos nossos dados com medições do SDO extraídas usando o software HelioViewer v2.2. O PySDIA alinhou e rotacionou efetivamente nossas imagens, alcançando excelente correlação entre as coordenadas das nossas manchas solares e as do SDO. Nossos resultados demonstram que medições precisas de coordenadas de manchas solares podem ser obtidas ao longo do tempo usando equipamentos prontamente disponíveis, permitindo contribuições independentes para registros e estudos de manchas solares.

Abstract

This work introduces PySDIA (Python Solar Disc Image Alignment), an automated Python code for image alignment and rotational correction of solar disc images captured with small aperture telescopes. We have been applied PySDIA to a set of 101 self-obtained images spanning November 8, 2022 to December 4, 2023, to characterize and extract heliographic coordinates for 250 sunspots. To validate our results, we compared our data with SDO measurements extracted using HelioViewer v2.2 software. PySDIA effectively aligned and rotated our images, achieving excellent correlation between our sunspot coordinates and those from SDO. Our results demonstrate that precise sunspot coordinate measurements can be obtained over time using readily available equipment, enabling independent contributions to sunspot records and studies.

Palavras-chave: telescópio de pequena abertura, manchas solares, coordenadas heliográficas, PySDIA.

Keywords: small aperture telescope, sunspots, heliographic coordinates, PySDIA.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.44352](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.44352)

1 Introdução

As observações das manchas solares desempenharam um papel crucial na compreensão da atividade solar. Os primeiros registros datam de 1500-1050 A.C. com astrônomos chineses realizando observações a olho nu [1]. Na Europa, as observações documentadas de manchas solares começaram por volta de 807 D.C. [2]. No entanto, os estudos sistemáticos começaram apenas em 1610 com o advento do telescópio por Harriot e Galileo [3]. Desde então, o Sol tornou-se um objeto passível de ser observado e registrado

nos mais variados comprimentos de onda e com foco principalmente nas manchas solares [3], que conduziu, por exemplo, às descobertas do ciclo de manchas solares de 11 anos por Schwabe em 1843 [4] e a rotação diferencial por Carrington em 1860 [5].

Uma das abordagens mais acessíveis para observar e estudar a superfície solar envolve a criação de um sistema de observação composto por um telescópio de pequena abertura, um filtro solar e uma câmera comercial. Com esta configuração é possível fazer observações e registrar

imagens diretamente, seja utilizando câmeras comerciais ou *webcams* adaptadas à ocular do telescópio, desde que um filtro de luz branca esteja sempre acoplado à lente objetiva [6–8]. Tais registros, mesmo com câmeras simples como as dos *smartphones*, poderiam ser a base para a criação de um catálogo independente de manchas solares. Ao fazer estas observações de forma consistente durante um período prolongado, registrando diariamente o disco solar, processando as imagens para melhorar a sua qualidade e armazenando-as cuidadosamente para análise posterior, é possível construir um valioso repositório de dados. Este catálogo pode permitir a extração de informações valiosas e o estudo de características físicas periódicas, permitindo o estudo da morfologia das manchas solares e a detecção de um padrão cíclico na atividade solar, já descrito por vários trabalhos como os de [4, 9–13].

Uma das aplicações que este catálogo também pode oferecer é a possibilidade de contribuir para programas oficiais de observação solar, como o programa de contagem de manchas solares administrado pela AAVSO (*American Association of Variable Star Observers*), descrito por [6], em seu livro “*The sun and how to observe it*”. Outra aplicação é inferir a rotação diferencial do Sol monitorando essas manchas solares ao longo dos dias, como feito por [5]. Esta atividade é acessível em vários níveis de complexidade, tornando-a flexível e adaptável a diferentes contextos de investigação e observação.

Um desafio significativo que encontramos nas nossas observações foi o de registrar imagens do disco solar preservando a mesma configuração inicial. Isso se deve a variações nas configurações dos equipamentos, telescópios e câmeras, em que os equipamentos são frequentemente montados e desmontados entre as sessões de observação. Isto torna impossível determinar com precisão os polos norte e sul celestes e a orientação do disco solar nas imagens, a fim de determinar um sistema de coordenadas, conforme descrito por [6]. Como resultado da variabilidade do sistema de observação, as imagens por nós obtidas mostram um disco solar deslocado do centro da imagem e rotacionado, podendo esta rotação variar, tanto pela inclinação do eixo de rotação solar, que varia durante o ano, como a configuração da posição da câmera. Esta variabilidade dificulta a

determinação precisa dos parâmetros de latitude e longitude das manchas solares, tornando essencial o alinhamento dessas imagens para a realização de estudos eficazes. O desafio, portanto, está no fato de que realizar o alinhamento manualmente, por meio de programas de edição de fotos, pode ser uma tarefa tediosa e suscetível a imprecisões, principalmente quando se trata de um grande volume de imagens. Além disso, o alinhamento manual pode resultar em erros sistemáticos nas medidas analisadas.

Diante desses fatores, desenvolvemos um código em linguagem de programação Python, denominado PySDIA¹ (*Python Solar Disc Image Alignment*). O PySDIA é um código desenvolvido na nossa Instituição, IFE/UFCA, sendo projetado para otimizar e automatizar o alinhamento de imagens do disco solar, um processo fundamental em diversas áreas da física solar. Sendo assim, o objetivo principal do nosso trabalho é apresentar e detalhar essa ferramenta computacional, com foco particular em seu processo de calibração.

A estrutura do artigo está organizada da seguinte forma: a segunda seção detalha os procedimentos e dados observacionais utilizados para validar o PySDIA. Na terceira seção, aprofundamos a descrição dos procedimentos metodológicos empregados no desenvolvimento e aplicação do código. A quarta seção apresenta e discute os resultados obtidos através da aplicação do PySDIA, evidenciando sua eficácia e potencial para física solar. Por fim, a quinta seção sintetiza as nossas conclusões.

2 Procedimentos observacionais e registros de manchas solares

Para o processo de observação do disco solar utilizando um telescópio de pequena abertura, e dependendo do nível de investimento, é possível utilizar as mais variadas câmeras digitais comerciais para capturar imagens do disco solar. Após o advento das câmeras digitais, houve avanços significativos no registro, processamento e arquivamento de imagens do disco solar, o que possibilitou o desenvolvimento do estudo das manchas solares. Os telescópios passaram então a ser equipados com instrumentos desse tipo, como o

¹<https://github.com/grangeirodario/PySDIA>



Figura 1: O processo de montagem da câmera no telescópio usando o método focal. À esquerda, câmera Canon EOS Rebel T6i com adaptador *T-Mount* no lugar da lente, ao centro, câmera acoplada ao telescópio e destacando o filtro solar, e à direita, telescópio alinhado e pronto para observação.

Observatório de Ebro, localizado na região da Catalunha/Espanha, que em 2001 foi equipado com uma câmera CCD (charge-coupled device) para registrar e estudar a fotosfera solar [14].

De maneira geral, os registros do disco solar podem ser feitos por qualquer pessoa que domina conceitos básicos de astronomia, para isso pode utilizar um telescópio simples de pequena abertura, acoplado a um filtro solar certificado e uma câmera digital, ou com a câmera do próprio *smartphone*. Com base nessa ideia, nós do Grupo de Física e Astronomia do Cariri (GFAC) iniciamos o monitoramento diário do disco solar em 2022 para registrar e estudar a evolução das manchas solares e suas características físicas. As observações e registros de dados foram e continuam sendo feitos a partir do nosso Instituto de Formação de Educadores - IFE, campus da Universidade Federal do Cariri - UFCA, localizado na cidade de Brejo Santo, interior do estado do Ceará, Brasil (latitude $-7,486^\circ$ e longitude $-38,984^\circ$).

Para observar e registrar as imagens, utilizamos um telescópio refletor Newtoniano Celestron Astromaster com abertura de 114 mm e distância

focal de 1000 mm com montagem equatorial germânica, filtro solar de luz branca Baader acoplado à abertura do telescópio e uma câmera *Canon EOS Rebel T6*. Esta câmera é categorizada como DSLR (*Digital Single Lens Reflex*), possui sensor CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) com resolução máxima de 1,04 milhão de *pixels*, que gera imagens com até 6000×4000 *pixels*. As gravações foram feitas no modo focal (foco primário). O modo focal consiste em uma técnica de observação e gravação em que retiramos a lente da ocular do telescópio e montamos a câmera (sem objetiva) diretamente na ocular do telescópio, utilizando um adaptador *T-Mount*, conforme mostra a Figura 1. Mais detalhes sobre o modo focal e afocal de observação e registro podem ser encontrados no trabalho de [15]. Na objetiva do telescópio utilizamos um filtro solar de luz branca Baader. Este filtro permite-nos visualizar com segurança o disco solar e consequentemente observar e registrar as manchas solares, pois quando observamos o Sol em luz branca, a camada que pode ser visualizada é a fotosfera, região onde se destacam as manchas solares.

Os dados são registrados diariamente quando as condições climáticas são favoráveis. As observações são feitas no período da tarde, por volta das 15h, e ao longo da semana (segunda a sexta) para monitoramento semanal do disco solar. Dias sem manchas solares, previamente verificados conforme dados base do SDO ou dias cujas condições não sejam favoráveis à observação, são desconsiderados para efeito de registro. Em relação às configurações da nossa câmera, adotamos: ISO 400 e tempo de abertura do obturador de 1/4000 segundo. Vale destacar que o ISO controla a sensibilidade do sensor à luz, valores mais altos captam mais luz, ideal para objetos pouco brilhantes em ambientes escuros, o que não era o nosso caso. Por outro lado, a velocidade do obturador determina o tempo de exposição do sensor à luz, tempos mais curtos congelam o movimento, ideal para objetos brilhantes e rápidos, nesse caso coerente para as observações do Sol. É importante fazer vários testes para determinar a melhor configuração para seu objeto de estudo. A respeito do processo de registro das imagens, elas são obtidas em RGB, características do equipamento, com dimensões de 6000x4000 *pixels*. Em cada observação, realizamos o registro em média de trinta imagens do disco solar usando o modo de disparo contínuo da câmera. Essas imagens são então empilhadas para gerar uma nova imagem a fim de melhorar sua qualidade.

2.1 Perspectiva do disco solar nas imagens

Ao registrar o disco solar para estudar a evolução das manchas solares, é importante considerar um método confiável para identificar os polos norte e sul do Sol nas imagens, a fim de determinar e comparar as coordenadas heliográficas que serão extraídas com imagens de referência. No entanto, esta pode ser uma tarefa desafiadora, já que os telescópios refletores frequentemente invertem as imagens. Além disso, o observador deve estar ciente de que o eixo solar e o equador sofrem variações anuais em suas posições. O equador solar está inclinado em um ângulo de $7,25^\circ$ em relação ao plano da órbita da Terra (a eclíptica). Ao longo do ano, a latitude heliográfica B_0 do centro do disco solar varia entre $+7,25^\circ$ e $-7,25^\circ$. O ângulo de posição P_0 entre o eixo solar e a direção norte-sul no céu varia entre $+26,37^\circ$ e $-26,37^\circ$ [7]

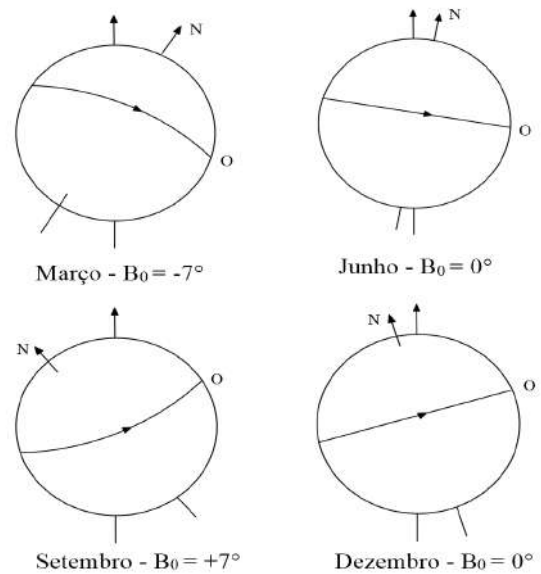


Figura 2: Ilustração das variações anuais na posição do eixo e do equador solar (imagem adaptada de [7]). Durante certas épocas do ano, o polo norte do Sol está inclinado em direção à Terra, enquanto em outras épocas está inclinado para longe da Terra.

conforme ilustrado na Figura 2.

Para definir a posição do eixo solar, uma abordagem simples é girar a imagem usando como referência uma imagem de mesma data e hora aproximada obtida de um observatório de referência como o *Solar Dynamics Observatory* (SDO). O SDO registra diversas imagens durante um único dia e seus dados são acessíveis publicamente e podem ser facilmente obtidos através do repositório do *Heliviewer*². Porém, ao utilizar imagens do SDO, encontramos alguns desafios. As imagens obtidas no SDO possuem dimensões de 4096x4096 *pixels* e nossas imagens possuem dimensões de 6000x4000 *pixels*, o que inicialmente resulta em discos solares de diferentes escalas entre as imagens. Além disso, a disposição do disco solar na imagem captada pelo nosso instrumento em relação ao centro da imagem pode mudar, diferentemente da imagem SDO, onde o disco solar fica perfeitamente centralizado na imagem, como pode ser visto na Figura 3.

Para resolver problemas de discrepâncias entre

²*Heliviewer.org* faz parte do *Heliviewer Project*, um projeto de código aberto para a visualização de dados solares e heliosféricos. O Projeto *Heliviewer* é financiado pela ESA e NASA.

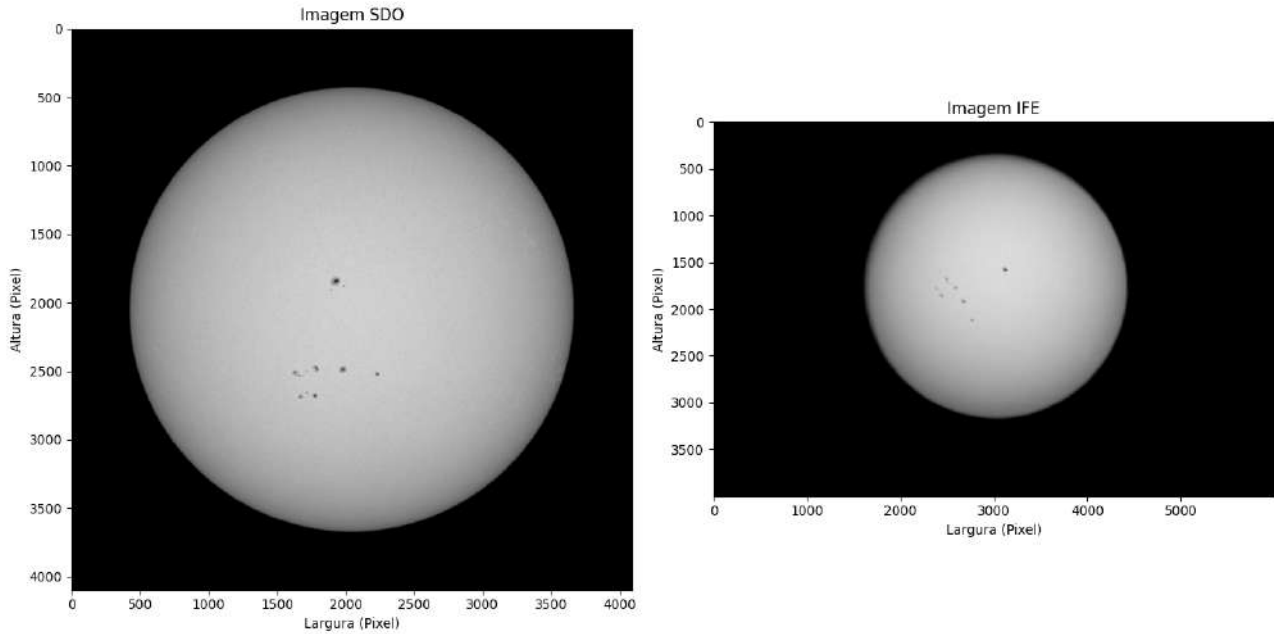


Figura 3: Comparação entre uma imagem SDO (esquerda) e a nossa própria imagem (direita) do mesmo dia, 12/04/2023. Nossas imagens têm resolução diferente das do SDO, o disco solar é deslocado do centro da imagem e rotacionado em um certo ângulo.

as nossas imagens e as de referência, poderíamos utilizar um programa de edição de fotos, mas isso seria cansativo e praticamente inviável devido à enorme quantidade de imagens. Uma extensa série de imagens é essencial para estudos de manchas solares de longo prazo, e alinhá-las manualmente exigiria muitas horas de trabalho e também poderia levar a muitos erros e imprecisões, o que prejudicaria a eficiência do trabalho. Com todos esses problemas em mente, desenvolvemos um código na linguagem de programação Python para centralizar e alinhar automaticamente nossas imagens. As etapas deste código serão detalhadas na seção a seguir.

3 Processamento e alinhamento de imagens utilizando o PySDIA

Devido à simplicidade do nosso telescópio portátil e ao movimento aparente do Sol ao longo dos meses, as imagens recolhidas mostrarão diferentes posições do disco solar. Por conta disso, nosso código utiliza uma imagem base com o disco solar centralizado e alinhado como referência, estabelecendo um padrão uniforme para todas as demais imagens gravadas. A Figura 4 mostra um exemplo do processo automatizado de alinhamento do

disco solar usando PySDIA em nossa própria imagem datada de 12/04/2023, em comparação com a imagem SDO correspondente. Vale ressaltar que todo o procedimento de centralização e alinhamento das imagens é feita através de um processo automatizado, conforme detalharemos na sequência.

3.1 Centralizando o disco solar

Iniciamos o processamento das imagens removendo inicialmente o fundo delas para evitar erros nessa fase. A seguir, convertemos a imagem obtida de RGB para escala de cinza, em 8 bits de representação, e criamos uma cópia binarizada de ambas as imagens, de modo que todos os *pixels* com valor de intensidade abaixo de um limite igual a 10 recebam um valor zero, e todos os *pixels* com valores acima recebam um valor máximo de nível de cinza. Este procedimento resulta em imagens cópia com um disco claro (valor de intensidade 255) sobre fundo escuro (valor de intensidade 0), conforme mostrado na Figura 4 (A).

A binarização é definida de acordo com a documentação do OpenCV [16], como:

$$dst(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{se } src(x, y) < thresh ; \\ Max & \text{se outra forma} \end{cases} \quad (1)$$

Etapas do procedimento de alinhamento

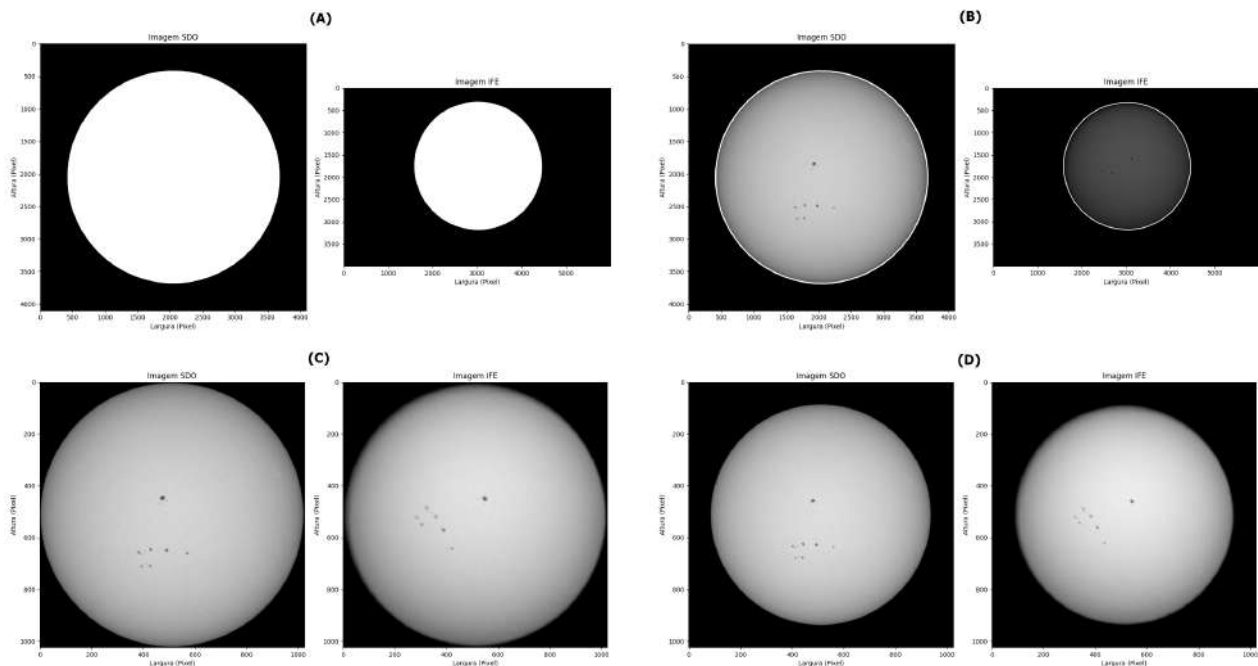


Figura 4: Etapas do processo automatizado de alinhamento do disco solar em uma de nossas próprias imagens datada de 12/04/2023, comparada com a imagem SDO correspondente: (A) binarização, (B) disco solar contornado, (C) imagem recortada de acordo com as coordenadas máximas e mínimas do contorno e (D) redimensionamento da imagem.

onde $dst(x, y)$ é a intensidade resultante, $src(x, y)$ é a intensidade a ser binarizada, $thresh$ é o valor limite definido (no nosso caso 10) e Max é o valor máximo do nível de cinza (no nosso caso 255). O valor escolhido para o limiar de binarização foi definido através da análise da intensidade dos *pixels* na região de borda do disco solar, onde se constatou que eles estão em média com valor de intensidade 10.

Após a etapa de binarização, criamos um contorno nas regiões onde a diferença entre as intensidades dos *pixels* é maior que 255, como a imagem binarizada possui um disco claro sobre fundo escuro, este procedimento contorna o disco solar binarizado conforme mostrado na Figura 4 (B). Assim, obtemos as coordenadas mínimas e máximas nos respectivos eixos x e y em *pixels* que correspondem ao início e ao final dos contornos da imagem. Utilizando essas coordenadas, redefinimos as imagens originais para que tenhamos os limites da imagem tangenciais às coordenadas mínimas e máximas do disco solar em ambos os eixos, conforme mostrado na Figura 4 (C).

A seguir, adicionamos uma borda de 110 *pixels* (tamanho em *pixels* da borda nas imagens

SDO) às duas imagens e estabelecemos a mesma dimensão, de 1024x1024 *pixels*, obtendo assim duas imagens centralizadas com discos solares de mesma escala, conforme mostrado na Figura 4 (D). Este procedimento é necessário para que o centro do disco solar em nossos registros coincida exatamente com o centro da imagem de referência, etapa essencial para o procedimento de alinhamento por rotação. Este procedimento é repetido automaticamente para todas as imagens capturadas no mesmo dia para que possamos passar à etapa de empilhamento.

3.2 Empilhamento de imagens

Após o procedimento de alinhamento, passamos para a fase de empilhamento das imagens capturadas naquele dia. Para esta etapa é necessário que todas as imagens estejam centralizadas, caso contrário, diferentes *pixels* seriam sobrepostos, gerando uma imagem distorcida. A técnica de empilhamento de imagens é uma abordagem comum no processamento de imagens e visa melhorar a qualidade visual de uma cena composta por diversas imagens. É constantemente utilizado em situações onde há variabilidade de ilumina-

ção, ruídos ou artefatos que podem dificultar a captura de uma boa imagem [17].

Para o nosso caso, consideramos como empilhamento simplesmente o cálculo da intensidade média de *pixels* em todas as imagens capturadas durante um dia de observação, ou seja, a intensidade de *pixels* na posição (i, j) na imagem resultante, que podemos representar por $I(i, j)$, é a soma dos valores de intensidade de pixel na posição (i, j) em cada imagem, dividida pelo número de imagens na série, que pode ser descrita como:

$$I(i, j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n I_k(i, j) \quad (2)$$

onde $I(i, j)$ representa o valor de intensidade de pixel resultante na posição (i, j) , n representa o número de imagens e $I_k(i, j)$ representa o valor do pixel na posição (i, j) da k -ésima imagem. Após o procedimento de empilhamento, obtemos uma nova imagem resultante.

3.3 Alinhamento rotacional

Concluídos os processos de centralização e empilhamento da imagem, passamos à fase de alinhamento, que consiste em girar a imagem de forma que as coordenadas dos pontos da imagem por nós obtida fiquem alinhadas com as coordenadas desses mesmos pontos na imagem de referência SDO do mesmo dia e horário aproximado. Em geral, uma imagem digital é uma matriz, de modo que cada elemento da matriz determina a intensidade do pixel correspondente. Assim, alinhar uma imagem com base numa imagem de referência significa alterar o sistema de coordenadas dessa imagem (por translação ou rotação) para uma configuração que seja a mais próxima possível da imagem de referência. Considerando que nesta fase temos os discos solares na mesma posição, precisamos portanto, modificar o sistema de coordenadas dos *pixels* através de rotação.

Como as imagens digitais são representações em duas dimensões, a rotação pode ser definida por um único ângulo θ com o eixo Z como eixo de rotação. Para fazer isso, usamos uma matriz de mudança de base para girar qualquer vetor $\vec{v}_{(x,y)}$ por um ângulo θ em torno da origem para obter $\vec{v}_{(x,y)}$, esta matriz é definida matematicamente como:

$$M_\theta = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ \text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

de forma que:

$$\vec{v}_{(x,y)} = M_\theta \times \vec{v}_{(x,y)} \quad (4)$$

Para realizar o processo de alinhamento é necessário determinar o ângulo correto para a transformação de coordenadas. Em um processo automatizado e considerando um grande número de imagens, diversas medidas angulares devem ser levadas em consideração. Nosso objetivo é alinhar automaticamente a imagem de interesse com a imagem de referência, caso em que uma abordagem ideal para atingir esse objetivo é comparar suas matrizes de intensidade de *pixels*.

Para isso, nosso código foi estruturado nesta etapa com a seguinte sequência: girar a imagem em intervalos de 1° , tomando como origem o centro da imagem e consequentemente do disco solar, e então comparar cada rotação com os dados de referência. Essa comparação é feita medindo a diferença relativa entre as duas observações. Considerando a matriz A como a imagem referencial e a matriz B como a rotacionada, a diferença absoluta entre A e B, denotada *Diff* é definida como:

$$Diff = A - B \quad (5)$$

e a diferença relativa *Diff_r* entre as matrizes A e B é definida como:

$$Diff_r = \frac{\sum Diff_i}{\sum B_i} \times 100 \quad (6)$$

Então criamos uma lista de 360 imagens com passos de 1° e realizamos uma comparação automática de cada uma das matrizes com base na observação utilizada como referência. A orientação que resulta na menor diferença relativa quando comparada com a imagem de referência é o ângulo que procuramos para o alinhamento. Na Figura 5, apresentamos um gráfico da diferença relativa em função do ângulo de rotação para duas imagens separadas por um ano. As imagens que utilizamos como referência para o processo de rotação foram obtidas por instrumentos diferentes dos nossos. Portanto, mesmo que a imagem esteja corretamente alinhada, a diferença relativa não chega a zero devido às diferenças na qualidade dos dados utilizados na comparação, uma

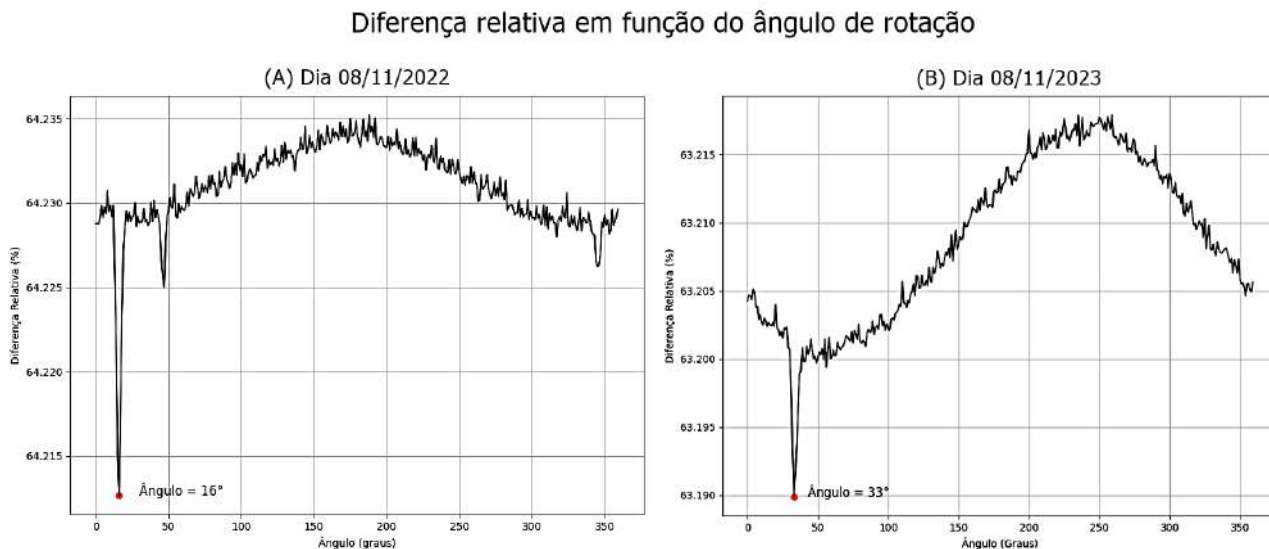


Figura 5: Diferença relativa entre a imagem de referência e a imagem alinhada em função do ângulo de rotação para 11/08/2022 (A) e um ano depois, 11/08/2023 (B), destacando seus respectivos ângulos de rotação.

vez que as imagens SDO possuem maior qualidade.

Na Figura 5 (A), traçamos a diferença relativa em função do ângulo de rotação entre as imagens do dia 11/08/2022, primeira observação feita pelo nosso grupo, e para esta imagem, descobrimos que o ângulo de rotação para a menor diferença relativa foi de 16° . Na Figura 5 (B), representamos a relação para a observação que fizemos um ano depois, ou seja, em 11/08/2023, e observamos a menor diferença relativa quando o ângulo de rotação é 33° . A diferença de ângulos demonstra a variabilidade de perspectivas obtidas ao registrar imagens do disco solar com equipamentos que são montados e desmontados diariamente.

3.4 Sistema de coordenadas heliográficas

Concluído o processo de alinhamento, temos uma imagem pronta para extrair as coordenadas heliográficas das manchas solares. Obter a posição de um elemento no disco solar significa definir um sistema de coordenadas para que possamos determinar sua posição dentro da imagem com relativa precisão. Qualquer estudo do movimento das manchas solares em relação à fotosfera requer um sistema de coordenadas absolutas, porém, este pode ser um trabalho bastante complicado, uma vez que a Terra está continuamente em órbita ao redor do Sol, criando diferentes perspectivas do disco.

De acordo com os trabalhos de [6, 7], para determinar o sistema de coordenadas heliográficas de um elemento do disco solar é necessário conhecer três parâmetros solares durante a data e hora da observação. São elas a inclinação que os polos tiveram durante a órbita anual da Terra, que determina a latitude heliográfica do equador solar, também chamada de B_0 , o deslocamento que o eixo de rotação do Sol tem em relação ao eixo de rotação da Terra, chamado P_0 e o meridiano central L_0 , que é uma linha imaginária traçada entre o polo solar norte e o polo solar sul. Os três parâmetros estão representados na Figura 6. Estas informações podem ser obtidas das Efemérides Solares, fornecido por diversas fontes, incluindo o *The Astronomical Almanac*.³

Após alinhar e rotacionar a imagem, o deslocamento do eixo de rotação e do meridiano central coincide com a linha imaginária que corta verticalmente o centro da imagem, de forma que para obter a latitude e longitude basta definir a quantidade B_0 de acordo com a data e hora da observação, para a qual utilizamos as bibliotecas Python Astropy [18] e Sunpy [19]. Utilizando Astropy, definimos a posição do Sol em relação ao observador criando um objeto *skycoord*, cujos pa-

³É uma publicação conjunta da *U.S. Nautical Almanac Office* nos *EUA Naval Observatory* e de *Her Majesty's Nautical Almanac Office* no Reino Unido e contém dados fornecidos por muitos cientistas e instituições de todo o mundo.

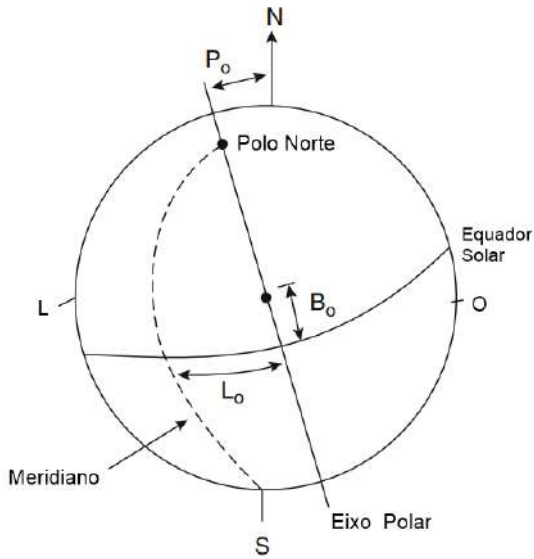


Figura 6: Sistema de coordenadas heliográficas definido com base em três parâmetros: oscilação dos polos durante a órbita anual da Terra (B_0), deslocamento que o eixo de rotação do Sol tem em relação ao eixo de rotação da Terra (P_0) e Meridiano Central (L_0) (imagem adaptada de [7]).

râmetros são a data e hora da observação, o observador (no nosso caso a Terra) e o sistema de coordenadas.

Em seguida, utilizamos a biblioteca Sunpy para criar um mapa do disco solar, determinando o sistema de coordenadas heliográficas na imagem, o que, entre outras coisas, nos permite desenhar um disco de Stonyhurst, uma grade circular com linhas de latitude e longitude sobrepostas a imagem para fazer referência às posições das manchas solares. Os parâmetros do Sunpy Map são a imagem e o cabeçalho FIT, obtido da função `sunpy.map.make_fitswcs_header`, esta função por sua vez tem como parâmetros a imagem, o objeto `skycoord` e a escala do disco solar em segundos de arco por pixel (fixado por nós em $2,4 \times 2,4$ segundos de arco/pix, correspondendo à escala do disco solar em imagens SDO). Desta forma, qualquer posição dentro do disco solar pode ser determinada em termos de latitude e longitude heliográfica.

3.5 Coordenadas heliográficas das manchas solares no disco

Com as imagens alinhadas e estabelecido o sistema de coordenadas, podemos finalmente obter as coordenadas heliográficas de cada man-

cha solar utilizando a função `ginput` da biblioteca Matplotlib [20]. Com esta função podemos clicar na imagem para obter as coordenadas daquele ponto em *pixels* e utilizar a função `pixel_to_world` do mapa Sunpy criado, para convertê-las de coordenadas de pixel para coordenadas no Sistema de Coordenadas Mundiais (*World Coordinate Systems - WCS*) de acordo com a documentação da Astropy⁴, o Sistema de Coordenadas Mundial descreve transformações geométricas entre dois conjuntos de coordenadas e uma aplicação comum é mapear os *pixels* de uma imagem para a esfera celeste. Então, usando o objeto `skycoord` criado anteriormente, convertamos essas coordenadas em coordenadas heliográficas de `stonyhurst` usando a função `transform_to(frames.HeliographicStonyhurst)`.

Podemos, portanto, determinar as coordenadas heliográficas de qualquer elemento dentro do disco solar a partir de imagens obtidas por observatórios profissionais ou telescópios de pequena abertura.

Utilizando o procedimento descrito no último parágrafo, podemos extrair as coordenadas das manchas solares nas imagens clicando no centro da umbra (aumentando o zoom naquela região). Para melhorar a precisão da captura, definimos uma região quadrada com dimensões de 25 pixels quadrados, tomando o pixel clicado como centro desta região e selecionando aleatoriamente 10 pixels dentro desta região. Uma vez obtidas as coordenadas desses *pixels*, calculamos a média de suas coordenadas e a partir dessa média consideramos o centro do ponto. O erro padrão associado à medição foi calculado tomando-se a razão entre o desvio padrão das coordenadas dos *pixels* obtidos aleatoriamente e a raiz quadrada do número desses mesmos *pixels*, procedimento descrito por [21] em seu trabalho como:

$$E_p = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

onde σ é o desvio padrão entre os elementos analisados e n é o número desses mesmos elementos. As fases operacionais do código são descritas em detalhes no Apêndice B.

⁴<https://docs.astropy.org/en/stable/wcs/>

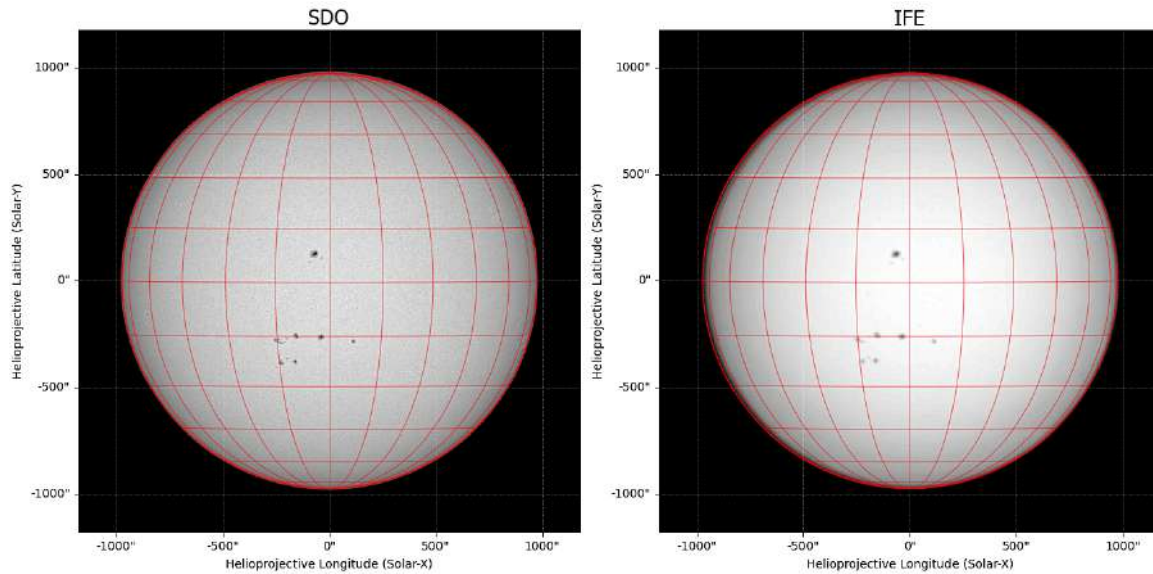


Figura 7: Comparação entre uma imagem de 4 de dezembro de 2023 processada pelo PySDIA (direita) e a imagem de referência SDO (esquerda). Ambas as imagens mostram o disco *Stonyhurst* e estão no sistema de coordenadas mundiais (segundos de arco).

4 Resultados

Com base nos procedimentos realizados, processamos e analisamos com sucesso nossas 101 imagens do disco solar, correspondendo a 250 dados de manchas solares durante os primeiros 12 meses de observações, conforme mostrado no Apêndice C. Essas imagens são preparadas para uma análise detalhada das características físicas das manchas (em preparação) e também seu comportamento dinâmico e evolutivo durante a fase atual do ciclo 25. A Figura 7 mostra uma comparação entre o resultado final do nosso processo de alinhamento para 4 de dezembro de 2023 e a referência do SDO. Ambas as imagens mostram o disco *Stonyhurst* sobreposto e em um sistema de coordenadas mundial (segundos de arco). Apesar das diferenças de qualidade devido às características dos nossos instrumentos e às influências atmosféricas, as imagens processadas possuem um sistema de coordenadas que nos permite obter latitudes e longitudes heliográficas com relativa precisão.

Para avaliar a eficácia do nosso código, analisamos 101 imagens do disco solar que passaram pelos processos de alinhamento e rotação. Obtivemos com sucesso as coordenadas heliográficas das 250 manchas solares presentes no disco e comparamos essas coordenadas com as das mesmas manchas presentes nas imagens SDO. O conjunto

de imagens utilizadas para esta análise abrangem o período de 08/11/2022 a 04/12/2023 e foram obtidas a partir de observações em nosso Instituto, levando em consideração os métodos acima mencionados. É importante notar que durante esta fase, consideramos apenas as manchas solares no disco que tinham umbra e penumbra claramente definidas visualmente.

Para calibrar e verificar nosso código, utilizamos o software *Helio Viewer v2.2* nas imagens de referência SDO para extrair de forma independente as respectivas coordenadas heliográficas das manchas solares. O software *Helio Viewer* foi desenvolvido por [22] e está disponível em seu website⁵. Com ele você pode carregar imagens do disco solar e adicionando os parâmetros de data e hora de observação, o software nos permite determinar as coordenadas das manchas solares clicando sobre elas, procedimento semelhante ao adotado pelo nosso código. Para melhor visualização dos resultados, distribuimos as coordenadas do IFE em função das coordenadas do SDO e também calculamos a diferença entre as coordenadas heliográficas das imagens SDO e IFE, subtraindo os valores das coordenadas de latitude e longitude entre essas imagens respectivamente, para obter o resíduo entre a diferença de

⁵<https://www.petermeadows.com/html/software.html>

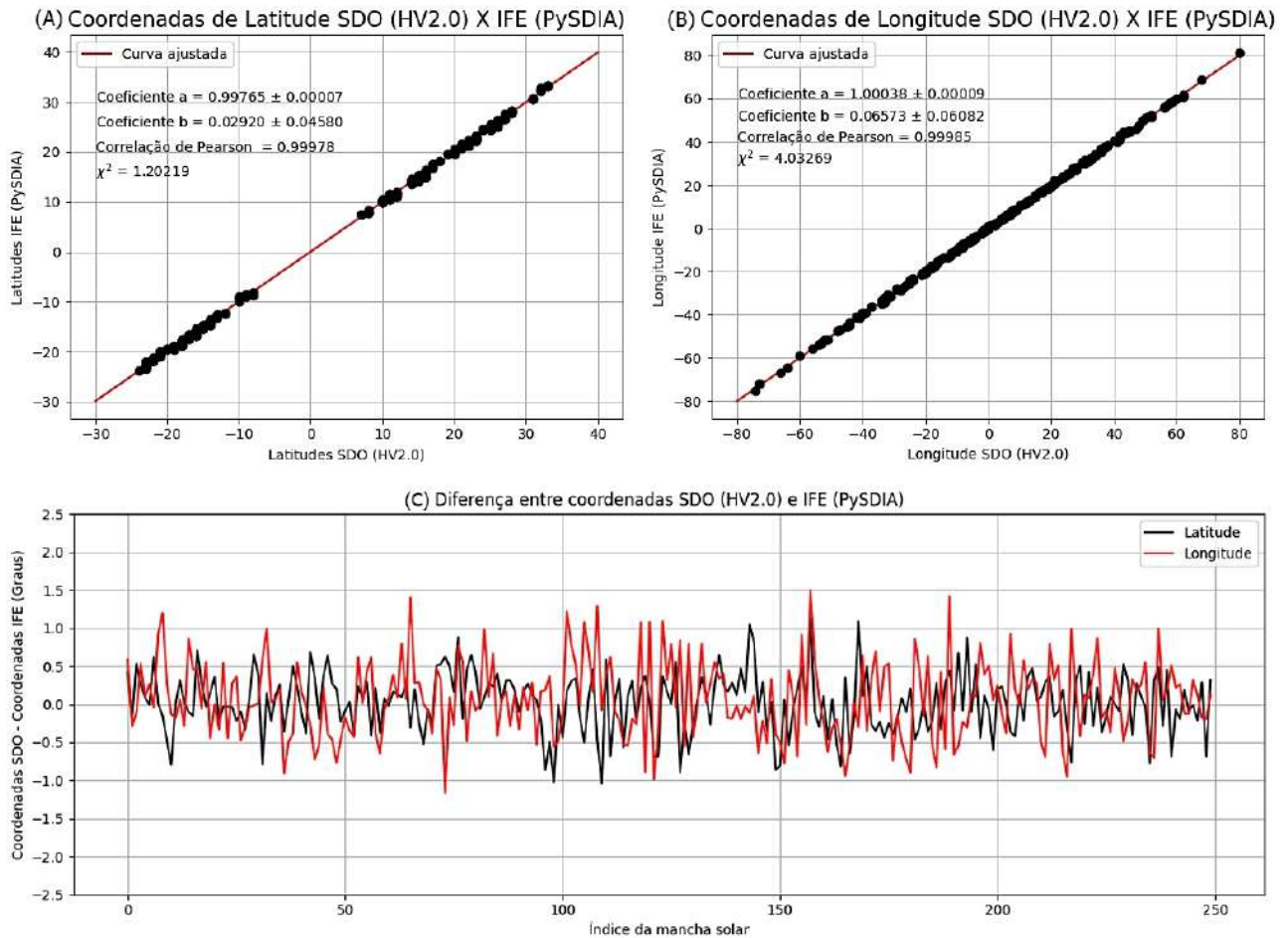


Figura 8: Análise de 250 manchas solares. Gráfico (A): Latitudes IFE em função das latitudes SDO, após os processos automatizados de alinhamento e rotação, a linha vermelha mostra o ajuste de linha. Gráfico (B): Longitudes IFE em função das longitudes SDO e também com ajuste de linha em vermelho. Gráfico (C) residual da diferença entre as coordenadas de latitude e longitude entre as imagens IFE e SDO.

coordenadas. Os resultados da análise são mostrados na Figura 8.

Na Figura 8 (A), os pontos pretos representam a distribuição das coordenadas de latitude IFE em função das coordenadas de latitude SDO. Observa-se também a falta de dados para latitudes entre -10° e 10° , o que é esperado na atual fase do ciclo solar 25, caracterizada pela fase anterior à atividade máxima. Nesta fase, não são observadas manchas solares próximas ao equador solar, comportamento comum na fase final do ciclo correspondente. Na Figura 8 (B), apresentamos a distribuição das longitudes IFE em relação às longitudes SDO. É observada uma representação abrangente das longitudes do disco solar, refletindo a análise de um número significativo de manchas solares e a mecânica da observação semanal. Este procedimento permite registrar as

manchas solares longitudinalmente à medida que evoluem ao longo do tempo.

Para avaliar o grau de precisão entre nossas coordenadas heliográficas e as do SDO, aplicamos um ajuste de linha por mínimos quadrados a ambos os conjuntos de dados, bem como calculamos a correlação de Pearson e realizamos um teste qui-quadrado. Para as latitudes, o coeficiente angular a foi estimado em $0,99765$ com erro de $\pm 0,00007$, enquanto o coeficiente linear b foi $0,02920$ com erro de $\pm 0,04580$. O valor do coeficiente a indica uma taxa de variação em torno de $0,99^\circ$ para cada 1° entre as latitudes IFE e SDO respectivamente, indicando uma forte correlação entre as variáveis. Já o coeficiente b , próximo de zero, denota um deslocamento vertical praticamente insignificante na relação entre as variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson é uma

medida de força e direção que reflete o grau de correlação linear entre duas variáveis [23]. Para as latitudes, registramos um coeficiente de 0,99978, indicando forte correlação positiva entre as variáveis. O teste qui-quadrado, por sua vez, é uma medida estatística que compara a distribuição observada e esperada dos dados [24], e para nossa análise obtivemos o valor de 1,20219, indicando um ajuste favorável do modelo aos dados.

No que diz respeito às longitudes, observamos um padrão semelhante ao das latitudes, com coeficiente angular $a = 1,00038$ com erro de $\pm 0,00009$ e coeficiente $b = 0,06573$ com erro de $\pm 0,06082$. Assim como acontece com as latitudes, há uma variação de aproximadamente 1° para cada 1° entre as longitudes IFE e SDO, respectivamente. Tal como acontece com as latitudes, o deslocamento vertical também é praticamente inexistente. A correlação de Pearson foi de 0,99985, indicando uma forte correlação positiva, enquanto o teste qui-quadrado foi de 4,03269, sugerindo uma distribuição um pouco mais dispersa entre os dados obtidos e os esperados.

Na Figura 8 (C), apresentamos o resíduo entre as coordenadas de latitude (linha preta) e longitude (linha vermelha) calculado a partir da diferença entre as coordenadas (latitude e longitude) do SDO e do IFE. Percebe-se que a maior parte do resíduo se limita à região entre 0° e $0,5^\circ$, com algumas medidas se aproximando de 1° e raramente ultrapassando $1,5^\circ$, mostrando mais uma vez que as medidas obtidas em nosso estudo estão de acordo com os dados das imagens SDO.

Apesar dos resultados promissores para uma observação com um telescópio simples e de pequena abertura, é importante notar que nossas imagens possuem qualidade limitada. Isso se traduz em dificuldade de análise das manchas solares menores, pois em nossas imagens elas aparecem desfocadas no disco solar, dificultando a distinção entre a intensidade dos *pixels* dentro e fora delas, inviabilizando sua análise. Esta limitação pode contribuir para os erros observados na rotação de algumas imagens. A obtenção de imagens com melhor qualidade poderia ajudar a minimizar esses problemas, uma vez que a nitidez das manchas solares é crucial para o correto funcionamento do código. Além disso, a presença de nuvens cobrindo o disco solar afeta tanto a observação quanto a extração dos parâmetros físicos

dessas manchas. Nestas circunstâncias, o código não consegue corrigir adequadamente a rotação, de forma que observações em dias nublados não poderão ser consideradas para validação do método.

5 Conclusão

As observações do disco solar utilizando telescópios simples e de pequena abertura têm um potencial significativo para contribuir para os estudos das manchas solares e do ciclo solar, uma vez que as observações da fotosfera solar podem ser feitas com equipamentos acessíveis, sem a necessidade de grandes áreas ou estruturas observacionais para registrar diversas imagens diárias. Isto torna possível desenvolver um catálogo próprio de manchas solares, com a possibilidade de suprimir dados faltantes de programas observacionais e auxiliar em análises comparativas com observatórios solares.

Neste estudo apresentamos os resultados obtidos em nosso primeiro ano de observação solar do IFE/UFCA, abrangendo o período de novembro de 2022 a dezembro de 2023, totalizando 101 imagens do disco solar e 250 registros de manchas solares. Além disso, introduzimos o algoritmo *Python Solar Disc Image Alignment (PySDIA)*, desenvolvido em linguagem Python, capaz de centralizar e alinhar automaticamente imagens do disco solar para determinar as coordenadas heliográficas precisas das manchas solares.

Nossos testes mostraram que o código foi altamente preciso no alinhamento de todas as imagens submetidas a ele. Ao comparar as coordenadas de latitude e longitude das 250 manchas solares analisadas pelo PySDIA com as mesmas manchas solares presentes nas imagens SDO, obtidas através do software *HelioViewer 2.2* de Peter Meadows, observamos uma variação de menos de 1° para ambas as latitudes e longitudes, com exceção de algumas imagens isoladas. Este resultado mostra uma taxa de variação de aproximadamente $0,99^\circ$ para cada 1° entre latitudes e longitudes nas duas fontes de dados analisadas. Além disso, foi observado um deslocamento vertical de apenas $0,05$, indicando uma relação linear robusta entre as variáveis e validando a precisão da nossa análise.

A utilização de telescópios de pequena abertura equipados com filtros solares, aliados a dispositivos de captação de imagens como câmaras, *webcams* ou mesmo câmaras de *smartphones*, permite aos astrônomos monitorizar e registar diariamente a fotosfera solar, possibilitando o estudo das manchas solares a partir da sua localização. Além da observação, a utilização de algoritmos como o PySDIA, por exemplo, para tratar as imagens, resultará em dados capazes de fornecer com maior precisão as coordenadas heliográficas das manchas solares, permitindo a exploração inicial deste estudo principalmente por astrônomos independentes, uma vez que eles podem desempenhar um papel crucial ao contribuir com as suas próprias observações para programas colaborativos e pesquisas sobre manchas solares e física solar.

Agradecimentos

Os autores, C. D. Grangeiro e T. S. S. Duarte, agradecem às seguintes instituições: Universidade Federal do Cariri – Instituto de à Formação de Educadores (IFE/UFCA) e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) pelo apoio financeiro; e o autor H. R. Coelho agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Sobre os autores

Cicero Dário Grangeiro (dario.grangeiro@aluno.ufca.edu.br), aluno do curso de graduação Licenciatura Interdisciplinar em Ciências Naturais e Matemática pelo Instituto de Formação de Educadores (IFE), campus da Universidade Federal do Cariri (UFCA) em Brejo Santo, Ceará. Atualmente é bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica financiado pela própria instituição UFCA, sob a orientação do professor Dr. Tharcísyo Sá e Sousa Duarte.

Tharcísyo Sá e Sousa Duarte (tharcisyo.duarte@ufca.edu.br), Professor do Instituto de Formação de Educadores da Universidade Federal do Cariri (IFE-UFCA) é bacharel em Física pela Universidade Federal da Paraíba

(2010), Mestre (2012) e Doutor (2016) em Física/Astrofísica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Astrofísica Estelar e Solar, atuando principalmente nos seguintes temas: magnetismo estelar, espectroscopia, espectropolarimetria, abundâncias químicas, estrelas análogas solares e gêmeas solares. Atualmente também atua na parte de divulgação científica e é coordenador do projeto itinerante Planetarium Kariri.

Jefferson Soares da Costa (jefferson.dacosta@ect.ufrn.br), Possui graduação em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006), mestrado e doutorado em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pós-doutorado na Université Toulouse III, Paul Sabatier. Têm experiência em astrofísica estelar, com ênfase em no estudo de rotação estelar, abundâncias químicas e magnetismo estelar. Atualmente é professor adjunto da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Coordenador do Mestrado Nacional em Ensino de Física - Polo 51.

Hugo Rodrigues Coelho (hugo.pesquisa@gmail.com) bacharel em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2011), mestrado em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2013) e doutorado em Stellar Astrophysics - University of Birmingham (UK - 2017). Tem experiência na área de astronomia, com ênfase em asterosismologia, estrutura e evolução estelar.

Referências

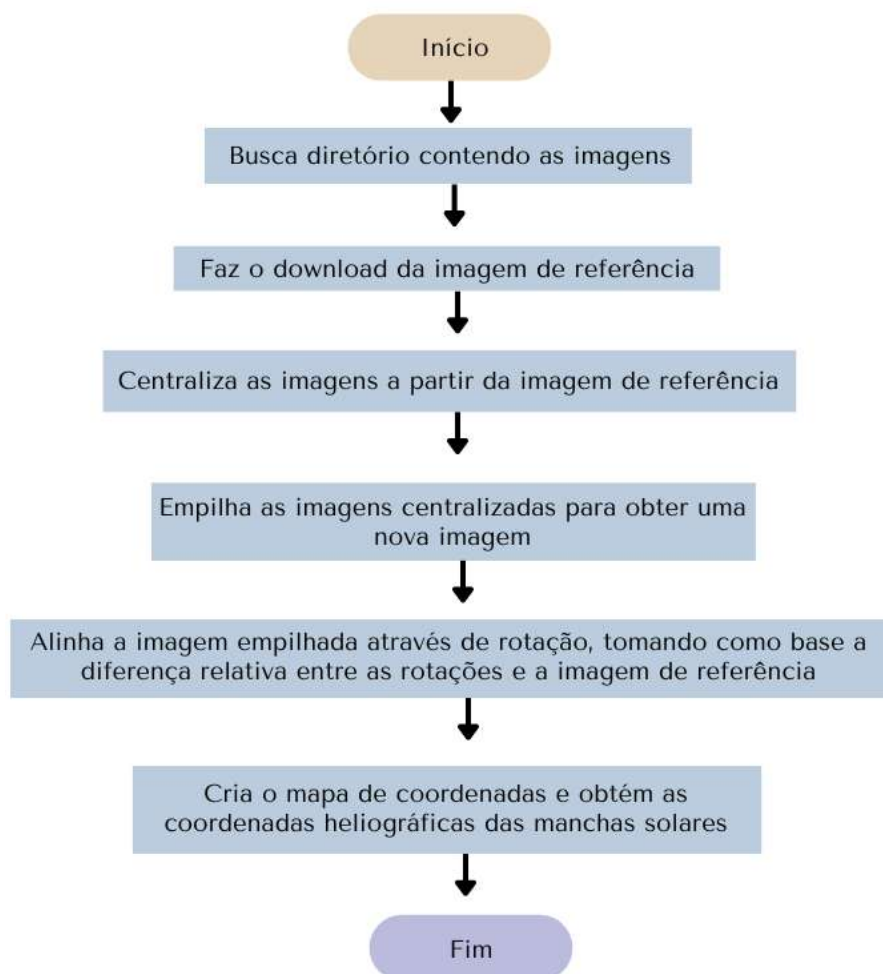
- [1] X. Zhentao, *Solar observations in ancient China and solar variability*, [Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences](#) **330**(1615), 513 (1990).
- [2] J. M. Vaquero e M. Vázquez, *The Sun recorded through history*, vol. 361 (Springer Science & Business Media, 2009).
- [3] D. V. Hoyt e K. H. Schatten, *The role of the sun in climate change* (Oxford University Press on Demand, 1997).

- [4] H. Schwabe, *Sonnenbeobachtungen im jahre 1843. von herrn hofrath schwabe in dessau*, *Astronomische Nachrichten* **21**, 233 (1844).
- [5] R. C. Carrington, *Observations of the spots on the Sun: from November 9, 1853, to March 24, 1861, made at Redhill* (Williams and Norgate, 1863).
- [6] J. L. Jenkins, *The Sun and How to Observe It* (Springer, 2009).
- [7] J. Wilkinson, *New Eyes on the Sun: A Guide to Satellite Images and Amateur Observation* (Springer, 2012).
- [8] L. Macdonald, *How to observe the Sun safely* (Springer Science & Business Media, 2012).
- [9] E. W. Maunder, *Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874-1902*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 64, p. 747-761 **64**, 747 (1904).
- [10] R. Arlt, *The sunspot observations by Samuel Heinrich Schwabe*, *Astronomische Nachrichten* **332**(8), 805 (2011).
- [11] D. H. Hathaway, *The Solar Cycle*, *Living Reviews in Solar Physics* **12**(1), 1 (2015).
- [12] S. Mandal et al., *Kodaikanal digitized white-light data archive (1921-2011): Analysis of various solar cycle features*, *Astronomy & Astrophysics* **601**, A106 (2017).
- [13] L. van Driel-Gesztelyi e M. J. Owens, *Solar Cycle*, *Oxford Research Encyclopedia Of Physics*. (2020).
- [14] J. Curto, M. Blanca e E. Martínez, *Automatic sunspots detection on full-disk solar images using mathematical morphology*, *Solar Physics* **250**, 411 (2008).
- [15] T. Barreto e G. Almeida, *Astrofotografia: técnicas e aplicações*, *Scientia Plena* **5**(11) (2009). Disponível em <https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/737>, acesso em ago. 2024.
- [16] G. Bradski, *The OpenCV Library*, Dr. Dobb's Journal of Software Tools (2000).
- [17] D. Ratledge, *Digital Astrophotography: The State of the Art* (Springer Science & Business Media, 2006).
- [18] A. M. Price-Whelan et al., *The Astropy Project: Building an open-science project and status of the v2.0 core package*, *The Astronomical Journal* **156**(3), 123 (2018).
- [19] The SunPy Community et al., *The SunPy Project: Open Source Development and Status of the Version 1.0 Core Package*, *The Astrophysical Journal* **890**, 68 (2020).
- [20] J. D. Hunter, *Matplotlib: A 2D graphics environment*, *Computing in Science & Engineering* **9**(3), 90 (2007).
- [21] R. Pucha, K. Hiremath e S. R. Gurumath, *Development of a code to analyze the solar white-light images from the Kodaikanal observatory: Detection of sunspots, computation of heliographic coordinates and area*, *Journal of Astrophysics and Astronomy* **37**, 1 (2016).
- [22] P. Meadows, *Helio Viewer v2.2 User Guide* (2023). Disponível em <https://www.petermeadows.com/html/software.html>, acesso em ago. 2024.
- [23] M. E. G. Martins e J. Rodrigues, *Coefficiente de correlação amostral*, *Revista de Ciência Elementar* **2**(2), 34 (2014).
- [24] M. R. Spiegel, *Estatística* (Makron, São Paulo, 1993), 3ª ed.

Apêndice A: Repositório, Versão Python e principais pacotes utilizados no PySDIA

O PySDIA pode ser encontrado em nosso repositório Github pelo link: <https://github.com/grangeirodario/PySDIA>. A versão Python utilizada para os procedimentos descritos nesse trabalho foi a versão 3.11.5. Dentre os pacotes Python utilizados no processamento das imagens, os principais deles foram: `hcpy`⁶ para download das imagens do banco de dados do helioviewer, `Matplotlib`⁷ para abertura e visualização das imagens, `Rembg`⁸ para remoção de fundo das imagens, `OpenCV`⁹ para leitura das imagens próprias, conversão de escala de cores e aplicação das transformações morfológicas, `Sunpy`¹⁰ para criação de mapas e manipulação de coordenadas, `Astropy`¹¹ para mapeamento e conversão de coordenadas e `SciPy`¹² para manipulação de matrizes.

Apêndice B: Fluxograma do funcionamento do PySDIA



⁶<https://hcpy.readthedocs.io/en/latest/>

⁷<https://matplotlib.org/3.5.0/index.html>

⁸<https://github.com/danielgatis/rembg>

⁹<https://docs.opencv.org/4.x/index.html>

¹⁰<https://docs.sunpy.org/en/stable/>

¹¹<https://docs.astropy.org/en/stable/>

¹²<https://scipy.org/>

Apêndice C: Coordenadas heliográficas de 250 manchas solares em comparação com os dados do SDO obtidos através do Software Helioviewer v2.2

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
08/11/22	3140	26,428 ± 0,0736	-17,413 ± 0,080	26	-18
08/11/22	3141	13,813 ± 0,0858	-24,291 ± 0,089	14	-24
08/11/22	3141b	14,533 ± 0,0770	-25,106 ± 0,092	14	-25
08/11/22	NaN	15,276 ± 0,0963	-33,469 ± 0,120	15	-34
10/11/22	3140	26,088 ± 0,0736	9,090 ± 0,080	26	9
10/11/22	3141	13,996 ± 0,0737	2,270 ± 0,071	14	2
10/11/22	3141b	14,623 ± 0,0808	-0,047 ± 0,082	14	0
10/11/22	NaN	16,007 ± 0,0774	-7,078 ± 0,064	16	-8
11/11/22	3140	25,849 ± 0,0904	22,199 ± 0,097	26	21
11/11/22	3141	13,529 ± 0,0817	16,280 ± 0,079	14	16
11/11/22	3141b	14,206 ± 0,0889	12,873 ± 0,075	15	13
11/11/22	NaN	16,005 ± 0,0796	5,821 ± 0,062	16	6
06/12/22	3156	25,316 ± 0,0697	-15,936 ± 0,082	25	-16
06/12/22	3157	17,019 ± 0,0922	-31,283 ± 0,131	17	-31
06/12/22	3153	-16,097 ± 0,0770	-4,137 ± 0,077	-16	-5
06/12/22	NaN	-18,151 ± 0,0734	-17,543 ± 0,091	-18	-18
07/12/22	3156	25,712 ± 0,0840	-3,527 ± 0,081	25	-4
07/12/22	3157	17,280 ± 0,0773	-18,059 ± 0,091	17	-18
07/12/22	3153	-16,031 ± 0,0802	8,557 ± 0,077	-16	8
07/12/22	NaN	-17,851 ± 0,0828	-5,444 ± 0,088	-18	-5
08/12/22	3158	25,360 ± 0,0799	9,000 ± 0,088	25	9
08/12/22	3159	16,778 ± 0,0799	-4,328 ± 0,086	17	-4
08/12/22	3155	-16,029 ± 0,0891	21,541 ± 0,102	-16	21
08/12/22	NaN	-18,031 ± 0,0752	7,556 ± 0,081	-18	8
14/12/22	3160	22,962 ± 0,0750	25,274 ± 0,095	23	25
14/12/22	3167	19,782 ± 0,0818	11,367 ± 0,074	20	11
14/12/22	3162	-13,094 ± 0,0739	6,527 ± 0,079	-13	7
14/12/22	3163	-18,332 ± 0,0849	-13,282 ± 0,091	-18	-13
15/12/22	3160	23,094 ± 0,0978	37,966 ± 0,119	23	38
15/12/22	3167	19,653 ± 0,0867	23,982 ± 0,103	19	24
15/12/22	3162	-13,609 ± 0,0846	20,016 ± 0,082	-14	20
15/12/22	3163	-18,792 ± 0,0827	-0,402 ± 0,082	-18	-1
16/12/22	3160	23,147 ± 0,0857	50,998 ± 0,109	23	50
16/12/22	3167	19,781 ± 0,0888	37,022 ± 0,137	20	37
16/12/22	3162	-13,874 ± 0,0974	33,072 ± 0,142	-14	33
16/12/22	3163	-18,736 ± 0,0806	12,197 ± 0,082	-19	12
19/12/22	3169	19,645 ± 0,0977	-44,905 ± 0,270	20	-44
19/12/22	3168	-15,937 ± 0,0638	-6,491 ± 0,074	-16	-6
20/12/22	3169	19,502 ± 0,0850	-31,385 ± 0,103	19	-31
20/12/22	3168	-15,778 ± 0,0753	6,548 ± 0,065	-16	6
21/12/22	3169	19,881 ± 0,0801	-17,846 ± 0,075	20	-18
21/12/22	3168	-15,381 ± 0,0859	19,976 ± 0,090	-15	20
03/01/23	3180	21,683 ± 0,0778	-21,261 ± 0,092	21	-21
03/01/23	3180b	16,360 ± 0,0849	-17,724 ± 0,098	16	-17
04/01/23	3180	21,807 ± 0,0774	-8,533 ± 0,084	22	-8
04/01/23	3180b	16,377 ± 0,0750	-4,779 ± 0,080	16	-5
05/01/23	3180	21,646 ± 0,0776	4,613 ± 0,089	21	5
05/01/23	3180b	16,271 ± 0,0693	8,536 ± 0,084	16	9
09/01/23	3184	-13,799 ± 0,0769	-66,765 ± 0,085	-14	-66

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
09/01/23	3182	-16,233 ± 0,0845	-18,461 ± 0,087	-16	-18
09/01/23	3181	-23,083 ± 0,0971	23,828 ± 0,092	-23	24
10/01/23	3184	-13,970 ± 0,0822	-53,340 ± 0,083	-14	-53
10/01/23	3182	-16,419 ± 0,0674	-5,431 ± 0,074	-16	-5
10/01/23	3181	-23,763 ± 0,0939	36,619 ± 0,116	-24	36
11/01/23	3184	-13,932 ± 0,1012	-39,979 ± 0,221	-14	-40
11/01/23	3182	-16,707 ± 0,0791	7,435 ± 0,073	-17	7
11/01/23	3181	-23,410 ± 0,0826	49,619 ± 0,094	-23	49
12/01/23	3184	-13,787 ± 0,0861	-27,382 ± 0,115	-14	-27
12/01/23	3182	-17,379 ± 0,0871	19,354 ± 0,083	-17	20
12/01/23	3181	-22,919 ± 0,0818	61,918 ± 0,081	-23	62
23/01/23	3198	24,981 ± 0,0765	-5,913 ± 0,079	25	-6
23/01/23	3190	-14,834 ± 0,0786	56,388 ± 0,077	-15	56
24/01/23	3198	25,124 ± 0,0808	6,091 ± 0,074	25	6
24/01/23	3190	-14,901 ± 0,0780	68,794 ± 0,081	-15	68
25/01/23	3198	25,274 ± 0,0752	19,070 ± 0,088	25	19
25/01/23	3190	-15,307 ± 0,0773	81,400 ± 0,084	-15	80
08/02/23	3213	32,199 ± 0,0795	4,280 ± 0,080	32	4
08/02/23	3109	27,745 ± 0,0791	13,289 ± 0,072	28	13
08/02/23	3216	24,479 ± 0,0937	-46,989 ± 0,291	25	-47
08/02/23	3214	10,934 ± 0,0777	-6,086 ± 0,084	11	-6
08/02/23	3214b	10,744 ± 0,0737	-13,384 ± 0,081	11	-13
09/02/23	3213	32,511 ± 0,0753	16,475 ± 0,095	32	16
09/02/23	3109	27,525 ± 0,0877	27,323 ± 0,083	27	27
09/02/23	3216	24,632 ± 0,0815	-34,169 ± 0,127	24	-33
09/02/23	3214	11,494 ± 0,0805	7,092 ± 0,078	11	7
09/02/23	3214b	11,165 ± 0,0777	-0,270 ± 0,076	11	0
10/02/23	3213	32,883 ± 0,0831	27,774 ± 0,093	32	27
10/02/23	3109	27,812 ± 0,1072	40,556 ± 0,135	28	40
10/02/23	3216	24,459 ± 0,0889	-21,485 ± 0,087	24	-21
10/02/23	3214	11,647 ± 0,0798	20,165 ± 0,089	11	20
10/02/23	3214b	11,419 ± 0,0779	12,920 ± 0,079	11	13
27/02/23	3234	22,937 ± 0,0862	23,004 ± 0,081	23	23
28/02/23	3234	23,085 ± 0,0930	36,986 ± 0,116	23	36
06/03/23	3239	33,281 ± 0,0862	5,101 ± 0,076	33	5
06/03/23	3241	28,232 ± 0,0774	-8,335 ± 0,087	28	-9
06/03/23	3242	10,405 ± 0,0818	-10,418 ± 0,097	10	-10
06/03/23	3245	-22,969 ± 0,0981	-38,940 ± 0,178	-23	-39
07/03/23	3239	33,313 ± 0,0812	18,173 ± 0,085	33	18
07/03/23	3241	28,312 ± 0,0746	4,711 ± 0,078	28	5
07/03/23	3242	10,186 ± 0,0850	4,132 ± 0,084	10	4
07/03/23	3245	-23,098 ± 0,0923	-25,325 ± 0,101	-23	-25
08/03/23	3239	33,156 ± 0,0890	30,222 ± 0,108	33	30
08/03/23	3241	28,270 ± 0,0852	16,927 ± 0,074	28	17
08/03/23	3242	10,123 ± 0,0735	17,281 ± 0,081	10	17
08/03/23	3245	-22,944 ± 0,0794	-12,528 ± 0,090	-23	-12
18/04/23	3282	11,802 ± 0,0860	7,167 ± 0,081	12	7
18/04/23	3282b	11,137 ± 0,0730	-6,814 ± 0,073	12	-7
19/04/23	3282	11,509 ± 0,0913	21,375 ± 0,097	12	21
19/04/23	3282b	10,975 ± 0,0810	7,442 ± 0,079	12	8
20/04/23	3282	11,994 ± 0,1009	33,511 ± 0,137	12	34
20/04/23	3282b	10,562 ± 0,0815	19,896 ± 0,091	11	20

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
24/04/23	3285	-17,825 ± 0,0981	-30,783 ± 0,141	-18	-32
25/04/23	3285	-17,697 ± 0,0833	-17,215 ± 0,089	-18	-18
26/04/23	3285	-17,660 ± 0,0755	-4,473 ± 0,089	-18	-5
27/04/23	3285	-17,158 ± 0,0895	7,970 ± 0,067	-17	8
22/05/23	3313	22,500 ± 0,1078	-40,922 ± 0,185	23	-42
22/05/23	3314	15,100 ± 0,1001	-15,315 ± 0,067	15	-16
22/05/23	3310	-20,536 ± 0,0807	-11,836 ± 0,086	-21	-12
23/05/23	3313	22,517 ± 0,0893	-27,714 ± 0,104	23	-29
23/05/23	3314	14,958 ± 0,0862	-0,076 ± 0,079	16	0
23/05/23	3310	-20,413 ± 0,0843	1,393 ± 0,081	-21	1
25/05/23	3313	22,319 ± 0,0862	-1,380 ± 0,081	23	-2
25/05/23	3314	15,024 ± 0,0953	27,907 ± 0,098	15	28
25/05/23	3310	-20,663 ± 0,0882	27,794 ± 0,105	-21	28
26/05/23	3313	22,435 ± 0,0802	11,482 ± 0,081	23	12
26/05/23	3314	15,104 ± 0,1103	41,455 ± 0,234	15	42
26/05/23	3310	-20,693 ± 0,1017	40,812 ± 0,184	-21	41
30/05/23	3315	-17,236 ± 0,0843	47,738 ± 0,090	-17	48
30/05/23	3320	-15,780 ± 0,0861	-71,922 ± 0,077	-16	-73
31/05/23	3315	-16,621 ± 0,1325	61,115 ± 0,074	-17	62
31/05/23	3320	-15,970 ± 0,0901	-58,920 ± 0,674	-16	-60
01/06/23	3323	-16,686 ± 0,0886	-74,987 ± 0,159	-16	-74
01/06/23	3321	-19,686 ± 0,1004	-45,374 ± 0,402	-19	-45
02/06/23	3323	-15,628 ± 0,0998	-31,911 ± 0,122	-16	-33
02/06/23	3321	-17,833 ± 0,1048	57,317 ± 0,159	-18	57
05/06/23	3326	25,006 ± 0,1099	-41,215 ± 0,196	25	-42
05/06/23	3321	-15,437 ± 0,0783	7,957 ± 0,074	-16	8
06/06/23	3326	25,111 ± 0,0974	-28,161 ± 0,090	26	-29
06/06/23	3321	-15,238 ± 0,0777	20,440 ± 0,104	-15	21
07/06/23	3326	25,339 ± 0,0901	-15,206 ± 0,078	26	-16
07/06/23	3321	-15,268 ± 0,0915	33,567 ± 0,110	-15	34
19/06/23	3335	-14,942 ± 0,0861	4,968 ± 0,077	-15	5
19/06/23	3339	-19,646 ± 0,1325	-47,206 ± 0,674	-20	-48
21/06/23	3335	-14,871 ± 0,0835	31,023 ± 0,131	-15	31
21/06/23	3339	-19,262 ± 0,0876	-19,723 ± 0,095	-19	-20
22/06/23	3335	-14,725 ± 0,1054	44,555 ± 0,468	-15	44
22/06/23	3339	-19,354 ± 0,0828	-5,665 ± 0,085	-20	-6
05/07/23	3359	-20,715 ± 0,0745	-1,187 ± 0,075	-21	-1
05/07/23	3359	-21,882 ± 0,0763	-8,015 ± 0,081	-22	-8
06/07/23	3359	-20,528 ± 0,0829	11,805 ± 0,082	-21	12
06/07/23	3359	-21,842 ± 0,0924	4,977 ± 0,076	-22	5
07/07/23	3359	-19,951 ± 0,0770	24,882 ± 0,111	-21	25
07/07/23	3359	-21,169 ± 0,0822	19,110 ± 0,089	-22	19
12/07/23	3372	21,897 ± 0,0815	-64,638 ± 0,084	22	-64
12/07/23	3363	-20,710 ± 0,0808	4,782 ± 0,080	-21	5
13/07/23	3372	22,653 ± 0,0772	-51,509 ± 0,085	23	-51
13/07/23	3363	-20,969 ± 0,0736	17,330 ± 0,091	-21	17
17/07/23	3372	22,139 ± 0,0830	1,598 ± 0,076	23	2
18/07/23	3372	22,195 ± 0,0776	14,503 ± 0,086	23	15
20/07/23	3372	22,059 ± 0,0788	40,224 ± 0,168	22	41
24/07/23	3379	14,464 ± 0,0793	-6,550 ± 0,088	15	-7
24/07/23	3377	-8,041 ± 0,0892	18,079 ± 0,095	-8	18
25/07/23	3379	14,204 ± 0,0795	6,318 ± 0,080	14	7

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
25/07/23	3377	-8,522 ± 0,0857	30,913 ± 0,134	-9	30
26/07/23	3379	14,027 ± 0,0898	19,735 ± 0,095	14	20
26/07/23	3377	-8,880 ± 0,0826	44,496 ± 0,706	-10	43
31/07/23	3387	20,891 ± 0,0776	-19,423 ± 0,085	21	-20
31/07/23	3386	10,702 ± 0,0856	6,063 ± 0,077	11	6
01/08/23	3387	21,105 ± 0,0775	-6,235 ± 0,093	21	-6
01/08/23	3386	10,541 ± 0,0861	19,376 ± 0,107	11	20
02/08/23	3387	21,065 ± 0,0674	6,693 ± 0,081	21	7
02/08/23	3386	10,484 ± 0,0937	32,801 ± 0,123	11	33
03/08/23	3387	21,187 ± 0,0828	19,484 ± 0,086	22	20
03/08/23	3386	10,348 ± 0,0805	46,063 ± 0,104	10	47
04/08/23	3387	21,353 ± 0,0782	32,461 ± 0,122	22	33
04/08/23	3386	10,783 ± 0,0783	59,024 ± 0,105	11	59
07/08/23	3394	-21,913 ± 0,0783	-13,301 ± 0,089	-23	-13
08/08/23	3394	-21,895 ± 0,0740	-0,354 ± 0,080	-22	-1
09/08/23	3394	-22,503 ± 0,0751	12,655 ± 0,086	-23	13
14/08/23	3403	25,739 ± 0,0959	-18,675 ± 0,083	26	-19
14/08/23	3403b	26,650 ± 0,0962	-24,303 ± 0,094	27	-25
15/08/23	3403	25,773 ± 0,0788	-5,093 ± 0,086	26	-5
15/08/23	3403b	26,561 ± 0,0912	-11,507 ± 0,081	27	-12
16/08/23	3403	25,747 ± 0,0746	8,532 ± 0,083	26	8
16/08/23	3403b	26,608 ± 0,0794	1,260 ± 0,082	27	2
17/08/23	3403	25,825 ± 0,0889	21,859 ± 0,099	26	22
17/08/23	3403b	27,080 ± 0,0862	14,502 ± 0,083	27	15
18/08/23	3403	25,902 ± 0,0831	35,286 ± 0,148	26	36
18/08/23	3403b	27,207 ± 0,0970	27,106 ± 0,111	27	28
21/08/23	3412	30,538 ± 0,0921	-36,144 ± 0,079	31	-37
21/08/23	3411	13,694 ± 0,0922	-0,535 ± 0,079	14	-1
21/08/23	3405	10,025 ± 0,0799	16,851 ± 0,072	10	17
22/08/23	3412	30,637 ± 0,0910	-23,362 ± 0,084	31	-24
22/08/23	3411	13,782 ± 0,0913	12,463 ± 0,087	14	13
22/08/23	3405	10,280 ± 0,0864	30,172 ± 0,138	10	31
23/08/23	3412	30,671 ± 0,0808	-10,580 ± 0,077	31	-11
23/08/23	3411	14,291 ± 0,0877	25,413 ± 0,103	14	26
23/08/23	3405	10,449 ± 0,0827	43,416 ± 0,418	10	42
28/08/23	3413	9,922 ± 0,0806	20,338 ± 0,103	10	21
28/08/23	3415	-9,332 ± 0,0758	1,452 ± 0,073	-10	2
29/08/23	3413	9,922 ± 0,1006	33,766 ± 0,150	10	34
29/08/23	3415	-9,125 ± 0,0786	14,694 ± 0,097	-10	15
31/08/23	3413	9,901 ± 0,0753	60,127 ± 0,186	10	60
31/08/23	3415	-8,476 ± 0,0719	41,102 ± 0,276	-9	41
30/10/23	3474	-17,444 ± 0,071	0,805 ± 0,059	-17	0
31/10/23	3474	-16,887 ± 0,056	15,396 ± 0,076	-17	15
01/11/23	3474	-18,071 ± 0,071	28,512 ± 0,063	-18	28
02/11/23	3474	-18,606 ± 0,068	42,052 ± 0,06	-18	42
02/11/23	3477	-12,798 ± 0,05	-53,749 ± 0,111	-13	-54
03/11/23	3474	-17,767 ± 0,056	55,876 ± 0,128	-18	56
03/11/23	3477	-14,003 ± 0,073	-41,377 ± 0,079	-14	-41
07/11/23	3477	-14,362 ± 0,068	10,92 ± 0,062	-14	10
08/11/23	3477	-14,419 ± 0,063	24,202 ± 0,065	-14	24
09/11/23	3477	-13,872 ± 0,062	37,993 ± 0,067	-14	38
10/11/23	3477	-14,212 ± 0,058	51,581 ± 0,077	-14	51

Continua na próxima página

Tabela 1 – *Continuação da tabela*

Data	Mancha	Latitude (IFE)	Longitude (IFE)	Latitude (SDO)	Longitude (SDO)
10/11/23	3483	8.37 ± 0.06	38.197 ± 0.08	8	38
13/11/23	3485	-9.528 ± 0.052	21.323 ± 0.065	-10	21
13/11/23	3485	-9.953 ± 0.045	34.283 ± 0.075	-10	34
22/11/23	3490	22.097 ± 0.069	-28.488 ± 0.072	22	-28
22/11/23	3492	20.29 ± 0.058	-34.69 ± 0.076	20	-34
22/11/23	3493	-12.635 ± 0.067	-47.205 ± 0.097	-13	-48
22/11/23	3494	-17.162 ± 0.057	-51.684 ± 0.114	-17	-52
23/11/23	3490	21.913 ± 0.062	-14.486 ± 0.061	22	-15
23/11/23	3492	20.194 ± 0.068	-20.636 ± 0.071	20	-20
23/11/23	3493	-12.313 ± 0.056	-33.948 ± 0.056	-12	-33
23/11/23	3494	-16.762 ± 0.064	-39.006 ± 0.075	-16	-40
24/11/23	3490	22.323 ± 0.069	-1.831 ± 0.066	22	-2
24/11/23	3492	20.508 ± 0.069	-8.418 ± 0.066	20	-8
24/11/23	3493	-12.257 ± 0.062	-20.875 ± 0.073	-12	-21
24/11/23	3494	-16.58 ± 0.071	-25.923 ± 0.077	-17	-26
28/11/23	3492	20.718 ± 0.066	44.403 ± 0.095	21	44
28/11/23	3502	18.218 ± 0.061	37.868 ± 0.068	18	37
28/11/23	3493	-12.369 ± 0.062	31.818 ± 0.07	-12	32
28/11/23	3494	-17.146 ± 0.068	25.93 ± 0.053	-17	26
28/11/23	3500	-16.902 ± 0.072	2.631 ± 0.054	-17	3
28/11/23	3501	-8.998 ± 0.066	-8.525 ± 0.055	-9	-9
29/11/23	3492	19.909 ± 0.07	58.111 ± 0.11	20	58
29/11/23	3502	17.529 ± 0.061	51.51 ± 0.112	17	52
29/11/23	3493	-12.684 ± 0.064	44.788 ± 0.092	-13	45
29/11/23	3494	-17.401 ± 0.046	38.329 ± 0.084	-17	38
29/11/23	3500	-16.722 ± 0.067	17.18 ± 0.064	-17	17
29/11/23	3501	-8.894 ± 0.065	4.258 ± 0.055	-9	4
30/11/23	3494	-17.029 ± 0.063	52.551 ± 0.111	-17	52
30/11/23	3500	-16.776 ± 0.061	31.359 ± 0.067	-16	32
30/11/23	3501	-8.691 ± 0.058	18.3 ± 0.053	-9	19
30/11/23	3505	-17.506 ± 0.061	43.998 ± 0.087	-18	43
30/11/23	3508	-15.285 ± 0.047	-52.945 ± 0.081	-15	-53
30/11/23	3507	7.455 ± 0.051	-55.815 ± 0.117	7	-56
01/12/23	3500	-8.687 ± 0.052	31.517 ± 0.047	-8	31
01/12/23	3501	-17.068 ± 0.066	45.217 ± 0.084	-17	45
01/12/23	3507	7.807 ± 0.055	-43.734 ± 0.082	8	-44
01/12/23	3508	-14.806 ± 0.057	-41.123 ± 0.100	-15	-41
01/12/23	3505	-17.091 ± 0.055	-32.121 ± 0.067	-17	-32
04/12/23	3507	7.987 ± 0.059	-3.678 ± 0.062	8	-4
04/12/23	3505	-16.210 ± 0.064	7.125 ± 0.064	-16	7
04/12/23	3508	-14.713 ± 0.063	-2.176 ± 0.067	-15	-2
04/12/23	3510	-14.684 ± 0.056	-9.197 ± 0.064	-14	-9
04/12/23	3511	-21.679 ± 0.070	-9.867 ± 0.055	-22	-10

Ciência, física e astronomia nas escolas e para as comunidades: relato de experiência

Cyntia Cristina Pereira, Lázaro Trancoso Pereira e Thalita Sartori Benincá

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Este artigo tem como objetivo analisar o Projeto de Extensão “Ciência, Física e Astronomia nas Escolas e para as Comunidades”, direcionado às comunidades e estudantes do ensino fundamental e médio de Domingos Martins, ES. De forma crítica e reflexiva, com base nos resultados alcançados, são discutidos o seu propósito, metodologia, história e inserção no contexto da educação científica do estado do Espírito Santo. Conclui-se que o projeto tem o potencial de estabelecer uma grande conexão entre as comunidades, as escolas e a Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), além de proporcionar benefícios significativos na cultura científica local.

Abstract

This article aims to analyze the Extension Project “Science, Physics and Astronomy in Schools and for Communities”, aimed at communities and elementary and high school students in Domingos Martins, ES. In a critical and reflective way, based on the results achieved, its purpose, methodology, history and insertion in the context of scientific education in the state of Espírito Santo are proposed. It is concluded that the project has the potential to establish a great connection between communities, schools and the Federal University of Espírito Santo (UFES), in addition to providing benefits to the local scientific culture.

Palavras-chave: projeto de extensão, educação científica, universidade, comunidades e escolas.

Keywords: extension project, scientific education, university, communities and schools.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.43890](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.43890)

1 Introdução

Os pilares que compõem uma universidade são o ensino, a pesquisa e a extensão. A extensão, em particular, serve como a ponte entre a universidade e a sociedade, permitindo a interação e o engajamento por meio de iniciativas científicas e culturais. A natureza da extensão universitária transcende a mera difusão de informação, favorecendo um diálogo rico em troca de experiências e conhecimento. Tal dinâmica enriquece o percurso educacional, ampliando a formação dos estudantes ao contribuir para o desenvolvimento de seu senso crítico, despertar um maior interesse pela ciência e estimular habilidades essenciais, como a oratória. Portanto, é importante que as atividades de extensão sejam concebidas em harmonia com os esforços de pesquisa e ensino, reforçando os alicerces sobre os quais se constrói a missão educativa das universidades [1].

A extensão deve ser percebida como um inter-

câmbio bidirecional, no qual a comunidade universitária vê “na sociedade, uma oportunidade para a materialização da prática de saberes acadêmicos” e, em troca, experimenta uma ampliação do conhecimento advinda do envolvimento e aprendizado de docentes e estudantes em iniciativas de projetos [2].

O projeto de extensão “Ciência, Física e Astronomia nas Escolas e para as Comunidades”, fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) através do edital N° 12/2022 - Universal de Extensão, tem como missão levar o conhecimento científico para além dos muros da universidade, alcançando a comunidade de Domingos Martins - ES.¹ Este projeto tem como metas enriquecer o conhecimento científico dos professores do ensino fundamental e médio, despertar o entusiasmo pela ciência em

¹O projeto também previa Marechal Floriano, mas apenas uma escola foi visitada nesta localidade.



Figura 2: Observação com telescópio solar e apresentação de planetário ao fundo. Fonte: Autor

- Atividade de observação do Sol (manchas e erupções solares) paralelamente às exposições do planetário;
- Seminários para alunos do ensino fundamental e médio abordando: “Telescópios na Terra e no Espaço”, “Newton, Galileu e a Física Moderna” e “Astrobiologia”;
- Dois minicursos com duração de 4h e intervalo de 30 minutos, voltados a alunos do ensino médio e que abordaram os temas: “Teorias da relatividade especial e geral” e “Cosmologia”;
- Oficinas de astronomia intituladas: “Sistema Solar de Bolso” e “Eclipses”, além de ter sido montada a mesa espaço-tempo;
- atividades de observação do céu noturno, embora esta tenha sido comprometida devido às condições climáticas.

A segunda visita foi realizada de 24 a 26 de Maio nos distritos de Sede, Santa Isabel e Biriricas mas também no município de Marechal Floriano. As escolas visitadas foram:

- EMEFM Mariano Ferreira de Nazareth (Sede);
- EEEFM Teófilo Paulino (Sede);
- EMEF Santa Isabel (Santa Isabel);
- EMEF Soído (Sede);



Figura 3: Alunos e Monitores na sessão de planetário móvel. Fonte: Autor

- EEEFM Emilio Oscar Hulle (Marechal Floriano);
- EMEF Biriricas de Cima (Biriricas);
- EMEF Eugênio Pinto Sant’Anna (Sede).

Em todas as escolas foram realizadas atividades como:

- Sessões de planetário (Figura 3);
- Observação solar;
- Seminários: ‘Estrelas’ e ‘Do Geocentrismo ao Heliocentrismo’ para Ensino Fundamental II;
- Seminários: “Mundo Quântico”, “Ondas Gravitacionais”, “A origem dos elementos químicos” e “A expansão do Universo” para Ensino Médio.

Na EEEFM Teófilo Paulino também ocorreu o minicurso “Buracos Negros e Objetos Compactos” que foi ofertado para a turma de finalistas.

Em 16 e 17 de Agosto foi realizada a terceira viagem do projeto até o distrito de Melgaço, onde ocorreu a participação das escolas:

- EMEF Gustavo Guilherme João Plaster;
- EMPEF Fazenda Schwanbach;
- EFA São Bento do Chapéu;
- EMEF Augusto Peter Berthold Pagung.



Figura 4: Alunos participando da Oficina "Sistema Solar de Bolso". Fonte: Autor

Para todos os alunos do ensino fundamental foram apresentados os seminários "Telescópios na Terra e no Espaço", "Buracos Negros" e "Do Geocentrismo ao Heliocentrismo". Como nas outras ações, foram realizadas a observação do Sol e a Oficina "Sistema Solar de Bolso" (Figura 4). Devido a ausência de infraestrutura em algumas escolas, o planetário só foi montando na EMEF Gustavo Guilherme João Plaster e EFA São Bento do Chapéu, mas diante disso, foi possível visitar duas escolas de Ensino Infantil a EMU-EIF Alfredo Kempim e EMUEF Rio das Pedras.

A visita ao distrito de Aracê aconteceu em dois momentos distintos. O primeiro em 16 e 17 de outubro, na Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, juntamente aos municípios de Venda Nova do Imigrante, Brejetuba e Afonso Cláudio. As escolas visitadas foram:

- EMEF Germano Lorosa;
- EMEF Luiz Pianzola;
- EMEF José Uliana;

O segundo momento foi em 16 e 17 de novembro com a participação das escolas:

- EMEF Aracê;
- EMEF Córrego São Paulo;
- EEEFM Pedra Azul.

Ocorreram sessões de planetário em todas as escolas junto com a observação solar. Foi realizada a oficina "Sistema Solar de Bolso" e também



Figura 5: Apresentação de seminário. Fonte: Autor

a oficina de Magnetismo, abordando a interseccionalidade entre Física e Astronomia. Os seminários realizados foram "Telescópios na Terra e no Espaço", "Astrobiologia", "Galileu, Newton e a Física Moderna", "Ondas Gravitacionais", "Astrofísica", "Geocentrismo ao Heliocentrismo", "Universo Primordial", "A Ciência do Eclipse Solar" e "Do que é constituída a matéria?" (Figura 5).

4 Resultados e Discussões

O impacto do projeto nas escolas tem sido bastante positivo. Ao ministrar palestras, oficinas e minicursos, observa-se que não apenas os estudantes estão se beneficiando, mas também os próprios professores. O material fornecido nessas apresentações tem sido um valioso suporte e recurso adicional para suas aulas. Além disso, os alunos têm demonstrado seu interesse de diversas maneiras, incluindo sessões prolongadas de perguntas e respostas após as atividades, iniciativas individuais de busca por membros do grupo do projeto para esclarecer curiosidades levantadas, a fim de compreenderem melhor o funcionamento da realidade. Muitos alunos também procuram saber mais sobre como ingressar na faculdade de física e em como se especializar nas áreas correlatas.

Em relação à participação e envolvimento das escolas, o projeto tem apresentado retornos significativos. Por exemplo, ao comunicar previamente a visita à instituição, é notável que ela se torna mais consciente de sua responsabilidade em auxiliar na divulgação dentro da comunidade local. Isso resulta na formação de uma rede de comunicação própria entre a escola e a comunidade, o que tem sido fundamental para ampliar o alcance do projeto. Em sua maioria, a informa-

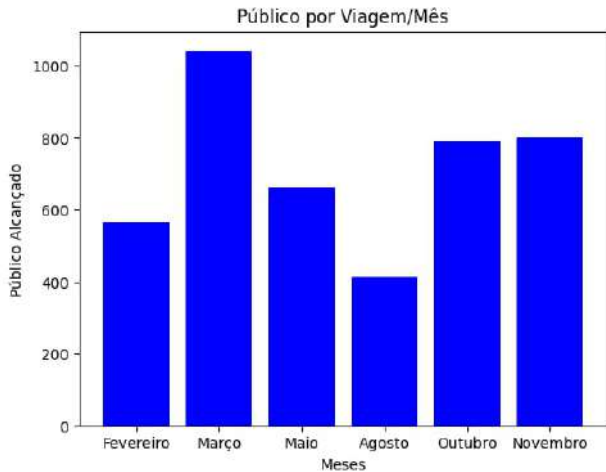


Figura 6: Público alcançado em cada viagem do projeto em 2023, cerca de 4260 alunos ao total. Fonte: autor.

ção sobre a presença do projeto na escola “A” é compartilhada com as escolas “B” e “C”, permitindo uma colaboração entre elas. Geralmente, a equipe do projeto consegue incluir outras escolas próximas na programação da visita atual, embora isso represente sempre um desafio de gerenciamento de tempo e organização por parte de várias pessoas.

A divulgação do projeto nas escolas também contribui para as observações noturnas, que é uma atividade voltada para a comunidade e geralmente ocorre em uma praça movimentada em locais com pouca iluminação artificial. Um telescópio é montado para observar o céu. Nessas observações, diversos corpos celestes já foram avistados: a Lua; Saturno, com seus anéis e sua lua Titã; Júpiter, com suas quatro maiores luas: Io, Europa, Ganimedes e Calisto; Vênus; e a constelação das Plêiades. Todavia, essas observações noturnas dependem do clima e infelizmente muitas já foram canceladas por causa desse fator. O número de participantes nessas observações varia consideravelmente, por vezes chegando a 30 pessoas ao longo da noite, enquanto em outras ocasiões contamos apenas com 5 pessoas ou até mesmo nenhuma. Isso indica a existência de obstáculos culturais a serem superados, pois é evidente a escassez de atividades científicas nesses locais, especialmente em áreas rurais, o que contribui para o baixo interesse pela ciência por parte dos cidadãos e cria uma lacuna na cultura científica local. O projeto pretende mudar esta realidade deletéria, levando a ciência cada vez mais

ao cotidiano das pessoas.

Os demais desafios enfrentados pelo grupo responsável pelo projeto abrangem desde dormir em escolas abandonadas pela falta de hotéis na região, até enfrentar caminhos de estrada de chão: fator esse que, dependendo do clima chuvoso, dificulta a locomoção tornando-a perigosa. Além disso, também há a resolução de muitas questões burocráticas com diretores de escolas e a Secretaria de Educação (SEDU) sobre a locomoção de alunos e o evento na escola. Todos esses empecilhos tornam-se úteis para dimensionar as dificuldades para desenvolver projetos como esse.

A visita a outros municípios exige um planejamento meticuloso por parte do grupo, incluindo a consideração do clima, a falta de restaurantes em algumas cidades e o contato com as escolas na região. Além disso, é necessário elaborar um cronograma detalhado, distribuindo as atividades por dias e horas específicas. Isso envolve a organização de uma variedade de atividades simultâneas, abrangendo diferentes áreas da astrofísica e cosmologia, como seminários, minicursos, oficinas e observações com telescópios. Também é essencial compartilhar o cronograma com a escola que será visitada para iniciar o processo de ajustes necessários com os diretores e pedagogos. Além disso, as atividades são adaptadas de acordo com a faixa etária dos participantes.

5 Conclusão

Em conclusão, é evidente que esse projeto de extensão desempenhou um papel importante na integração entre a Universidade e a sociedade. De modo que, essa iniciativa enriquece a formação dos alunos e professores, mas também promove um diálogo entre o conhecimento produzido no meio acadêmico e a comunidade.

A partir das reflexões deste trabalho, torna-se evidente que para futuras ações devemos priorizar o engajamento ativo dos alunos e professores. Este envolvimento, exemplificado pelas perguntas e colaboração durante as atividades, demonstra a eficácia da abordagem pedagógica adotada. Portanto, é fundamental desenvolver materiais educacionais atrativos e promover métodos de ensino participativos que estimulem o pensamento crítico e a curiosidade dos estudantes. Outro ponto crucial é o estabelecimento de uma rede

de comunicação eficiente entre as escolas, O Núcleo Cosmo-Ufes, que organiza as atividades, e a comunidade local, visando maximizar o impacto do projeto. Além disso, um planejamento abrangente de todas as atividades será essencial para otimizar recursos e garantir uma execução eficaz.

O projeto em questão demonstrou sucesso tanto em alcançar seus objetivos quanto em superar desafios. Ao atingir um público significativo de mais de 4000 alunos em um ano, fica claro que há uma demanda por iniciativas desse tipo em áreas onde tais oportunidades são escassas. Além disso, a abordagem adaptativa do projeto, que considera as características específicas de cada comunidade e faixa etária, evidencia um compromisso com alcançar um bom resultado para as atividades propostas.

No entanto, permanecem desafios a serem superados, como a falta de atividades científicas em áreas rurais e as dificuldades logísticas enfrentadas pela equipe do projeto. Contudo, tais obstáculos não diminuem o potencial transformador dessas iniciativas, mas sim, destacam a necessidade contínua de apoio e desenvolvimento de projetos de extensão que buscam estreitar a relação entre a Universidade e a sociedade, promovendo assim uma cultura científica mais inclusiva e participativa.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossa gratidão à FAPES pelo suporte financeiro vital ao nosso projeto de extensão. Esse apoio tem sido crucial para realizar nossas atividades e atingir nossos objetivos, possibilitando uma experiência educacional enriquecedora. Agradecemos também ao IFES - Campus Guarapari pela parceria na execução das atividades e à Secretaria de Educação de Domingos Martins pelo auxílio na organização e progresso do projeto, especialmente nas visitas escolares. Sua colaboração foi fundamental para o sucesso e impacto positivo de nossas ações nos estudantes.

Sobre os autores

Cyntia Pereira (cyntia.c.silva@edu.ufes.br) é graduanda em Física Licenciatura pela Univer-

sidade Federal do Espírito Santo (UFES), atualmente cursando o sétimo período. Desde 2022, é bolsista no Núcleo Cosmo-Ufes, onde participa ativamente de projetos de extensão promovidos pelo grupo. Possui experiência como monitora de iniciação científica júnior e no uso de telescópios. Sua área de pesquisa é focada em soluções computacionais para problemas da Mecânica Clássica, com ênfase no “Problema dos Três Corpos”.

Thalita Sartori Benincá (thalita.beninca@edu.ufes.br) é graduanda de Física Bacharelado cursando o quinto período na Universidade Federal Espírito Santo (UFES), foi monitora no Observatório Astronômico do IFES-Guarapari e desde 2022 é bolsista do Núcleo Cosmo-Ufes atuando na organização de projetos de extensão como a Astronomia nas Montanhas Capixabas e a Mostra de Astronomia do Espírito Santo. Sua área de pesquisa é focada na modelização de galáxias, mas também tem interesse em inteligência artificial aplicada à astronomia.

Lázaro Trancoso Pereira (lazaropereira@edu.ufes.br) é graduando em Física Licenciatura pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), atualmente cursando o sétimo período. É bolsista do Núcleo Cosmo-Ufes e atua como organizador de diversos projetos de extensão, incluindo o "Universo no Parque" e "Mostra de Astronomia". Sua área de pesquisa é focada no ensino das cores através da percepção, buscando formas inovadoras de facilitar a compreensão desses conceitos. Lázaro também possui experiência na criação de aparatos didáticos voltados para o ensino de física e em atividades de divulgação científica.

Referências

- [1] J. Manchur, A. L. A. Suriani e M. C. Cunha, *A Contribuição de Projetos de Extensão na Formação Profissional de Graduandos de Licenciaturas*, *Conexão* **9**(2), 334 (2013). Disponível em <https://revistas.uepg.br/index.php/conexao/article/view/5522>, acesso em ago. 2024.
- [2] C. J. A. Chaves et al., *Projetos de Extensão Universitária: Um Compromisso da Universidade com a Inclusão Social*, *Holos* **2**, 1 (2019).

O Instagram como ferramenta para divulgação científica em astronomia: um estudo de caso na região do Cariri Cearense

Claudio do Nascimento Souza¹, Tharcísyo Sá e Sousa Duarte¹, Gilson Francisco de Oliveira Junior¹, Jefferson Soares da Costa² e Milene Rodrigues Martins³

¹Universidade Federal do Cariri

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte

³Universidade Federal da Fronteira Sul

Resumo

Este estudo explora o potencial do Instagram como ferramenta de divulgação científica em Astronomia, detalhando as experiências de um projeto de extensão na Universidade Federal do Cariri, especificamente durante o período de pandemia da covid-19. Através da análise de dados de uma página vinculada ao projeto, observamos o potencial da rede e a predominância de um público jovem engajado com tais conteúdos. Além disso, analisamos os dados da Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica, durante o período de 2012 a 2020, e observamos uma queda significativa na participação das escolas do Cariri Cearense, possivelmente devido à falta de incentivo na área e à pandemia da covid-19. A metodologia ativa do projeto, aliada ao uso de ferramentas como o Stellarium e à criação de materiais culturais como cordéis e tirinhas científicas, provou ser eficaz na difusão de conhecimentos astronômicos. Dessa forma, conclui-se que essa rede social, com sua combinação de imagens atraentes, informações concisas, recursos interativos e um amplo alcance, é uma ferramenta promissora para a divulgação científica em Astronomia e demais áreas do conhecimento na nossa região.

Abstract

This study explores the potential of Instagram as a tool for science communication in Astronomy, detailing the experiences of an extension project at the Universidade Federal do Cariri, specifically during the covid-19 pandemic. By analyzing data from a page linked to the project, we observed the potential of the network and the predominance of a young audience engaged with such content. In addition, we analyzed data from the Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica, during the period from 2012 to 2020, and observed a significant drop in participation from schools in Cariri Cearense, possibly due to a lack of incentive in the area and the covid-19 pandemic. The project's active methodology, combined with the use of tools such as Stellarium and the creation of cultural materials such as cordéis and scientific comic strips, proved to be effective in spreading astronomical knowledge. It is therefore concluded that this social network, with its combination of attractive images, concise information, interactive resources and a wide reach, is a promising tool for scientific dissemination in astronomy and other areas of knowledge in our region.

Palavras-chave: divulgação científica, astronomia, rede social

Keywords: science communication, astronomy, social networking

1 Introdução

A Astronomia é amplamente reconhecida como uma das ciências mais fascinantes, despertando o interesse de pessoas de todas as idades. Isso se deve, em grande parte, à sua capacidade de estimular a imaginação, instigar a curiosidade e conectar diversos campos do saber, tornando-se uma ciência verdadeiramente interdisciplinar [1].

Contudo, a complexidade inerente de muitos de seus conceitos pode representar um desafio considerável para o público em geral, especialmente para aqueles sem formação científica [2]. Nesse sentido, a divulgação científica desempenha um papel crucial na superação dessas barreiras, facilitando a compreensão não só da Astronomia, mas de diversas áreas do conhecimento científico.

A emergência sanitária mundial da covid-19,

declarada pandemia em 2020, ressaltou a importância da ciência e do trabalho dos cientistas na resposta a crises globais. O isolamento social, que se fez necessário para conter a propagação do vírus, resultou na suspensão de grande parte das atividades presenciais, especialmente no setor educacional. Como consequência, instituições de ensino e universidades precisaram adotar, de forma ágil, alternativas digitais para garantir a continuidade das suas funções de ensino, pesquisa e extensão [3]. Nesse novo contexto, o uso de plataformas digitais emergiu como uma ferramenta essencial para a comunicação científica e não científica, permitindo a disseminação de conteúdos por meio de formatos inovadores e acessíveis. Em muitos casos, essas soluções provaram ser indispensáveis para manter o engajamento e a difusão do conhecimento durante e após a crise.

As atividades extensionistas, tradicionalmente vistas como uma ponte entre a academia e a sociedade, desempenham um papel fundamental no ensino de ciências e na divulgação científica, aproximando o conhecimento acadêmico do público, especialmente em regiões como o Cariri Cearense, conforme destacado por Longhini, Gomide e Fernandes (2013) [4]. Entretanto, as atividades de extensão foram significativamente impactadas pela pandemia da covid-19. O distanciamento social exigiu a reestruturação de projetos que antes dependiam essencialmente da interação presencial, como palestras, observações e oficinas. Apesar dessas limitações, a necessidade de manter o diálogo com a comunidade impulsionou a busca por novas formas de divulgação científica. Nessa perspectiva, plataformas digitais, a exemplo do Instagram, emergiram como ferramentas essenciais para a continuidade dessas ações. Isso foi particularmente relevante em áreas como a Astronomia, onde o uso criativo de redes sociais possibilitou a adaptação às novas circunstâncias.

Nesse contexto, o projeto Observando o Céu do Cariri: Divulgação Científica através da Astronomia, vinculado à Universidade Federal do Cariri (UFCA), demonstrou uma notável capacidade de resiliência e flexibilidade. Com mais de seis anos de atuação, o projeto tem se destacado por seu compromisso em promover o conhecimento científico em linguagem acessível, especialmente na região do Cariri. Durante a pandemia, a adaptação às novas realidades conduziu o projeto a explorar

diferentes meios de comunicação, com destaque para a migração para plataformas digitais, como o Instagram. Essa mudança não só permitiu a manutenção do engajamento com a comunidade, mas também ampliou o alcance e o impacto das atividades extensionistas, evidenciando a eficácia dessas ferramentas na continuidade e expansão da divulgação científica e do ensino de Astronomia.

O presente estudo tem como objetivo relatar as experiências de uso da rede social Instagram como uma plataforma eficaz para a divulgação científica, destacando sua eficiência e dinamismo, particularmente durante o período da pandemia, no âmbito do projeto de extensão Observando o Céu do Cariri. Este projeto, que é conduzido por estudantes do curso de Licenciatura Interdisciplinas em Ciências Naturais e Matemática, adotou uma metodologia ativa, na qual os discentes assumiram um papel central em seu processo de aprendizagem, partindo da premissa de que o conhecimento é melhor assimilado quando os alunos participam ativamente, praticando, discutindo e ensinando os conteúdos estudados [5]. Além disso, também são apresentados os resultados de uma análise de dados da Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA), visando avaliar o nível de acesso e a interação das instituições de ensino básico com os temas de Astronomia na região do Cariri Cearense. Essa análise busca contribuir para o fortalecimento do ensino de Astronomia na região e oferecer uma base sólida para futuras pesquisas. O artigo é finalizado sintetizando as principais descobertas do estudo, ressaltando a relevância das estratégias utilizadas para a divulgação científica e a educação em Astronomia.

2 Divulgação científica: breve contexto histórico e papel das mídias sociais

Os primeiros relatos de divulgação científica (DC) remontam à Europa dos séculos XIX e XX. O termo mais próximo da DC naquela época era a vulgarização científica, como mencionado nos trabalhos de Albagli (1996) [6]; Caldas e Crispino (2017) [7]; Germano e Kulesza (2007) [8]. Esses autores destacam que a vulgarização científica não tinha como objetivo alcançar o público não especializado em Ciências e muitas vezes usava

uma linguagem pouco acessível. Naquela época, a “divulgação” era principalmente em latim e direcionada aos intelectuais, como os membros da *Royal Society* de Londres, um ambiente voltado para questões científicas e demonstrações destinadas a um público-alvo específico.

No Brasil colonial, a DC adotou uma nomenclatura diferente da Europa, embora com os mesmos princípios. Conforme abordado por Moreira e Massarani (2002) [9], o termo divulgação era tratado como difusão, correspondendo aos diálogos e concepções compartilhadas entre estudiosos brasileiros que retornavam de suas formações em instituições internacionais no início do século XIX. Gradualmente, as manifestações consistentes de atividades de divulgação científica no Brasil começaram a se intensificar, principalmente com a chegada da Corte Portuguesa e a criação da Imprensa Régia em 1808, e a partir dos anos 1835, no Rio de Janeiro, com o lançamento da Revista Miscelânea Científica e a distribuição oficial dos primeiros artigos de divulgação da Ciência [9].

Na metade do século XIX, após a segunda revolução industrial na Europa, os benefícios do progresso técnico se espalharam pelo mundo e, embora em menor escala, também no Brasil. Como resultado, cerca de 80% da população apresentava analfabetismo científico, uma vez que a educação científica era extremamente restrita e limitada à elite. No entanto, mesmo nessas circunstâncias, a divulgação científica começou a se expandir através de materiais publicados pela Revista do Rio de Janeiro em 1876, que tinha ligações com o então imperador Dom Pedro II, conhecido por seu interesse e promoção da ciência [10].

Apesar de suas raízes no século XIX, foi apenas no século XX que a divulgação científica ganhou mais popularidade. Um exemplo disso foi a criação da Rádio Sociedade pela então Academia Brasileira de Ciências (ABC) em 1923, composta por um grupo de cientistas, professores e intelectuais, inclusive com uma breve locução de Einstein sobre a importância da divulgação científica. Na segunda metade do século XX, por volta da década de 80, várias outras atividades com características de DC exerceram influência na educação brasileira. Conversas e palestras despertaram a curiosidade e o interesse dos jovens pelos conhecimentos científicos, embora em níveis ainda inferiores aos de países desenvolvidos, uma vez que

o Brasil havia iniciado apenas recentemente sua busca por uma educação mais abrangente [9].

Atualmente, o conhecimento advindo de pesquisas é disseminado por meio de diversas ferramentas de divulgação, tais como revistas e jornais especializados, livros, palestras e diálogos promovidos por instituições de ensino, com o objetivo de promover uma educação didática, igualitária, discursiva e crítica. No entanto, entre todas essas ferramentas, as redes sociais têm se destacado, pois atendem às necessidades dos jovens por notícias rápidas e visualmente atrativas. É importante ressaltar que não devemos confundir a divulgação científica com a popularização da ciência ou popularização científica (PC), conforme descrito em estudos de Germano e Kulesza (2007) [8]; Langhi e Nardi (2009) [11]. Uma vez que, os objetivos da PC vão além de apenas divulgar e popularizar a ciência, pois provocam movimentos que permitem a participação do público-alvo, enfatizando o diálogo sobre os movimentos sociais e culturais locais ou regionais. Vale ressaltar que ainda há controvérsias no uso desses termos.

2.1 *Uso da DC nas mídias sociais e o conhecimento tradicional*

Quando há interseção entre a divulgação científica ou popularização científica com a “internet” é esperada uma disseminação e/ou fomentação mais ampla dos conhecimentos científicos, seja através dos meios clássicos de notícias, como os jornais, revistas, museus e rádios; seja também através das telas de TVs, computadores, celulares e mídias sociais. Além disso, tais ferramentas podem colaborar com as instituições de ensino básico e superiores na elaboração de estratégias para expansão da Ciência, especificamente a Astronomia, e contribuir com o processo de alfabetização científica (AC) na sociedade como um todo [11, 12].

É relevante destacar que a alfabetização científica, de acordo com Germano e Kulesza (2007) [8], e Leal e Gouvêa (2000) [13], vai além do ato de saber ler e escrever textos, pois se trata de indivíduos que estão aptos a ler a natureza, compreender a tecnologia, a ciência, e os movimentos sociais e culturais a elas atrelados. Por outro lado, existem indivíduos que não conseguem interpre-

tar e/ou ler a natureza, ou seja, não especializados em Ciências, pessoas sem uma fundamentação adequada, que permita compreender as leis naturais, descrevê-las e compartilhá-las de forma metodicamente coerente. Essas pessoas também não conseguem identificar os avanços tecnológicos, movimentos sociais e peculiaridades locais de uma comunidade, devido à falta de orientação adequada durante sua educação básica. Em resumo, há ainda aqueles que não conseguem expressar opiniões de natureza científica [8].

Um dos nossos objetivos é enfrentar o analfabetismo científico, que é a incapacidade de obter uma “leitura da ciência”; isso porque, se considerarmos a ciência como uma linguagem, a AC seria o meio mais viável de sua leitura, assim como afirma Chassot (2003) [14]. Para tanto, os desafios vão desde a infraestrutura escolar, formação profissional e continuada de docentes envolvidos; até questões políticas, sociais e econômicas [15].

Outro ponto que vale ser destacado sobre as dificuldades na AC, é a emergente “distribuição” de materiais desprovidos de conhecimento científico nas mídias sociais. Isso porque, de acordo com Menegusse, Silva e Gomes (2021) [12], o principal desafio da atualidade não se trata da quantidade de informações veiculadas, mas da sua qualidade. O surgimento das ferramentas de comunicação em massa, como as próprias mídias sociais, permite que todos atuem como protagonistas na propagação de conteúdos informativos, em que se destaca a necessidade de uma maior atenção quanto à veracidade das informações.

Como há uma produção em massa de notícias difundidas nos mais variados meios de comunicação, surge a necessidade de ter uma precaução na veiculação/difusão de boatos e *fake news*, notícias falsas, presentes constantemente nas mídias sociais. Logo deve ser de interesse das instituições de ensino básico e superiores, através da utilização e criação de mídias sociais (Instagram, Facebook e Twitter), assim como através da DC, combater as notícias oriundas de informações duvidosas, propagando conhecimento de qualidade e acessível ao público externo a essas instituições.

Como estamos em uma sociedade na qual muitos dos jovens utilizam as redes sociais para socialização, tal ferramenta pode ser utilizada como um espaço não formal, pois se relacionam com instituições cuja função básica não é apenas a

Educação formal, mas também a não formal de ensino [16]. Dessa forma, as redes sociais podem ser utilizadas como ferramentas que fogem dos métodos tradicionais de ensino (aulas expositivas e não-dialogadas), proporcionando momentos de reflexão e criticidade, e assim conquistar com uma maior facilidade a população, que possui interesse sobre a temática de Astronomia e ciências afins.

Conforme os pesquisadores Langhi e Nardi (2010) [11], se essas ferramentas pertencentes aos espaços de uma educação não-formal ou informal forem utilizadas com a finalidade de participarem efetivamente do processo de ensino-aprendizagem de forma planejada, sistemática e sequencial, elas deixam de se tornar meras oportunidades de atividades educacionais não-formais e informais, de complementação ou de lazer e contribuem ativamente para a educação em ciência, em especial da Astronomia, que é nosso objeto de estudo.

Diante disso, torna-se indispensável discutir um pouco sobre o “conhecimento tradicional”, que é constituído de saberes, inovações e práticas pertencentes a uma população local ou regional, construídos através das experiências desenvolvidas durante os séculos, adaptando-as à cultura e ambiente em que são transmitidas e/ou construídas de geração para geração [17].

O “saber tradicional”, oriundo de nossos ancestrais, contribuiu para o surgimento de diversas áreas do conhecimento, que desejam compreender um pouco mais sobre o mundo ao nosso redor, como, por exemplo, a Astronomia. Segundo Carl Sagan (2017) [18], a Astronomia nos revelou um universo tão antigo e tão enorme, que as questões humanas parecem, à primeira vista, ser irrelevantes. Tal afirmação evidencia a curiosidade do homem em entender os diversos mundos, locais inóspitos e segredos guardados no universo, em constante anseio por novas descobertas através da ciência e da tecnologia existente [19].

Porém, sabemos que nem todas as pessoas tiveram ou têm acesso à ciência durante a sua jornada nos ambientes escolares, e quando se fala de temas relacionados à Astronomia, a lacuna é ainda maior, particularmente nas regiões afastadas dos grandes centros e metrópoles, locais que se destacam por uma quantidade maior de centros provedores da divulgação ou popularização científica [7]. A ausência de DC ou PC, juntamente com a falta de fomento à Ciência e Astronomia,

induz a concepções equivocadas ou incompletas sobre diversos fenômenos astronômicos, visto que o “conhecimento tradicional” que foi transmitido de geração para geração é a única fonte de saber para muitas realidades.

Concomitante a essa realidade, as redes sociais, em consonância com a DC, podem ser utilizadas, especificamente, com a intenção de reorganizar os equívocos preexistentes, na perspectiva de torná-los compreensíveis e próximos às realidades científicas. De acordo com Fernandes e Santos (2013) [20], a divulgação científica não está restrita apenas aos produtores do conhecimento, os divulgadores, pesquisadores e docentes, mas sim encontra-se presente no cotidiano das pessoas, na cultura e numa vasta quantidade de materiais, sejam eles, escritos ou orais.

Dessa maneira, é possível perceber que há nitidamente um grande potencial educativo na promoção da alfabetização científica, principalmente quando efetuadas as ações de divulgação científica através das mídias sociais, uma vez que um grande público, bastante heterogêneo, está constantemente conectado aos mais diversos produtos gerados por essas mídias. Além disso, a utilização das tecnologias integradas e/ou associadas às ações de extensão, possibilitam atingir um público mais amplo e que outrora não tinha acesso ou conhecimento sobre temáticas científicas e, principalmente, relacionadas com Astronomia, proporcionando dessa forma uma socialização de saberes, garantindo um acesso democrático à informação para toda a população interessada, além de sua participação cidadã, seja através da popularização e/ou divulgação científica.

3 Análise da experiência com a divulgação científica

A introdução ao ensino remoto, em resposta à pandemia, levou-nos a repensar métodos e formas de proporcionar a divulgação científica em Astronomia. Em virtude disso, para o desenvolvimento deste estudo, optamos por utilizar a plataforma Instagram como espaço não formal de ensino, considerando seu caráter coletivo e práticas educativas fora do ambiente institucional. Nesse contexto, os extensionistas experimentam a liberdade de escolher métodos e conteúdo de

aprendizagem, características inerentes aos meios de comunicação, como afirmam Langhi e Nardi (2010) [11].

O Instagram foi escolhido, principalmente, devido à sua potencialidade de atrair os jovens, visto o elevado índice numérico de usuários mais jovens, sendo estatisticamente uma das redes sociais mais populares entre esse público em comparação, por exemplo, ao Tik Tok e Facebook, com cerca de 68% de contas logadas entre o público mais jovem até o ano de 2021 [21].

Essa ferramenta possibilita a veiculação de vídeos de curta e longa duração, bem como a publicação de diversos materiais. Além disso, essa escolha estava alinhada com o objetivo do projeto de extensão da UFCA, Observando o Céu do Cariri: Divulgação Científica Através da Astronomia, que consistia em propagar conhecimento científico durante a pandemia da covid-19, nos anos de 2020 e 2021, período em que diversas medidas de isolamento social foram implementadas, tornando as redes sociais em fonte principal de comunicação com a sociedade.

No referido projeto de extensão o estudo desenvolvido foi fruto de uma metodologia ativa, assim como nos trabalhos de Oliveira et al. (2020) [5]; Filho e Galluzzi (2021) [22]. Nesse tipo de metodologia, entre as principais características, destacam-se:

- Estímulo ao estudante para resolver as atividades de forma proativa, utilizando sua criatividade e desenvolvimento cognitivo;
- Promoção da liderança, onde o aluno é reconhecido como co-construtor do seu conhecimento, aprendendo com os colegas e se engajando e motivando na aprendizagem;
- Facilitação do desenvolvimento do pensamento crítico e reflexivo sobre os temas abordados.

Ademais, segundo Rodrigues, Oliveira e Santos (2021) [23], pode ser destacada uma abordagem quali-quantitativa, onde é possível extrair interpretações pessoais a partir dos dados coletados através da rede social e dos dados disponibilizados no site da OBA, e desta forma compreender melhor o fenômeno estudado. Esse tipo de pesquisa mista é crucial, uma vez que proporciona

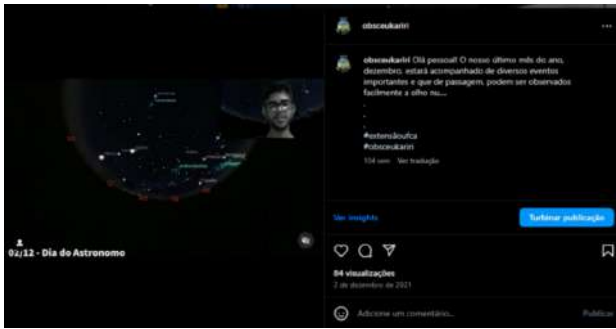


Figura 1: Publicação sobre o calendário mensal, neste caso referente ao mês de dezembro de 2021, simulado por meio do Stellarium.

a interpretação de eventos, fatos e processos, demandando uma análise profunda e reflexiva por parte dos pesquisadores. A combinação desses métodos não apenas possibilita uma compreensão mais confiável, mas também confere maior profundidade de significados, riqueza interpretativa e precisão no objeto de estudo [23].

O relato de experiência, foi construído sobre uma perspectiva descritiva. O propósito desta modalidade de pesquisa é descrever informações acerca de um objeto de estudo específico e/ou fenômeno, estabelecendo, dessa forma, um campo de trabalho e mapeando as condições associadas ao objeto em questão. Isso é realizado, por meio de técnicas padronizadas de coleta de dados, como a observação sistemática [24]. Em outras palavras, um dos seus objetivos é identificar a utilidade pedagógica de uma rede social como ferramenta para promover o interesse pela Astronomia, contribuindo para a construção do conhecimento científico através da divulgação e/ou popularização dessa ciência. Além disso, buscase fornecer subsídios para futuras pesquisas nesse campo.

Assim, ao considerarmos a transição para o ensino remoto, podemos destacar que essa mudança suscitou inúmeras reflexões sobre a flexibilidade e resiliência necessárias para enfrentar esses desafios inesperados. Essa mudança de paradigma resultou em uma série de abordagens para facilitar o aprendizado, aproveitando ao máximo as tecnologias disponíveis. Dessa forma, descreveremos a seguir, de maneira breve, a estrutura das atividades e os dados coletados durante as ações de DC em Astronomia desenvolvidas no projeto de extensão Observando o Céu do Cariri, no pe-



Figura 2: Amostragem de algumas publicações na página do projeto @obsceukariri. (A) e (B): materiais, pôlderes e vídeos; (C) e (D): tirinhas sobre constelações, asterismos e teorias planetárias.

ríodo de dois anos (2020 - 2021), entre os meses de maio e dezembro de cada ano.

3.1 Apresentação dos dados constituídos

Durante o período de execução remota do projeto, uma das principais ações foi a produção de materiais digitais, como, pôlderes, vídeos, tirinhas e enquetes, sendo semanalmente veiculadas no Instagram do projeto @obsceukariri apresentado na Figura 1 e Figura 2. A página do projeto foi configurada para ficar aberta ao público em geral, permitindo uma maior interação com os usuários da plataforma, inclusive os que não seguem a página.

Para execução do projeto foram realizadas reuniões semanais com os participantes, incluindo bolsistas/discentes do curso de Licenciatura Interdisciplinar em Ciências Naturais e Matemática, utilizando a plataforma Google Meet. O objetivo dessas reuniões foi analisar os dados e as interações extraídas da rede social e definir os tópicos a serem explorados nas semanas seguintes.

As publicações postadas sobre os mais variados temas astronômicos, em específico os pôlderes e tirinhas, foram desenvolvidas por meio da ferramenta digital Canva, e para o processo de edição



Figura 3: Representação da Constelação do Homem Velho a partir do Stellarium - Na extremidade esquerda, temos uma pena chamada Eixu, a cabeça é constituída pelo Tapi'i rainhykã, a perna saudável pelo Joykexo e a perna amputada representada pela estrela Betelgeuse.



Figura 4: Representação das constelações da cultura ocidental, que fazem parte da representação oficial da União Astronômica Internacional. O asterismo do homem velho, da cultura Tupi-Guarani, é formado a partir das constelações de Taurus e de Orion, observáveis no início da noite entre os meses de dezembro e março.

de vídeos, foram empregados os *softwares Movavi Video Editor* e *OBS Studio*, capazes de gravar os vídeos em alta resolução.

Um exemplo ilustrativo de nossos materiais está apresentado na Figura 1, por meio de um vídeo que aborda mensalmente fenômenos astronômicos, tais como fases da Lua, conjunções entre planetas e estrelas, chuvas de meteoros e as constelações predominantes de cada período. Além disso, na Figura 2, cada subdivisão destaca alguns dos diversos materiais já desenvolvidos, incluindo constelações, temas de Astronomia contemporânea e contextualizações históricas e culturais em (A) e (B). Nas tirinhas, exploramos várias teorias e asterismos que são características da cultura de diversas civilizações. Em particular, a tirinha (C) aborda o Gigante Protetor, enquanto a tirinha (D) explora a constelação da Ema.

Todos os materiais foram pensados em temáticas voltadas à área de educação, principalmente no que se refere aos tópicos propostos pela Base Nacional Comum Curricular (BNCC), presente na Terceira Unidade Temática da disciplina de Ciências Naturais, nos anos iniciais e finais do Ensino Fundamental, Terra e Universo, que propõem abordagens relacionadas às características dos planetas, estrelas, satélites naturais e de outros corpos celestes; suas dimensões, composição, localizações, movimentos e forças que atuam entre eles; Astronomia e Cultura; e Ordens de Grandezas [25].

De forma geral, abordamos temáticas voltadas à ciência e Astronomia, tais como: características; dimensões; teorias de formação estelar, planetária e lunar; cultura e etnoastronomia (Astro-

nomia Cultural), ciência que estuda o conhecimento astronômico dos povos tradicionais atuais; e os eventos astronômicos que acontecem mensalmente nos céus, assim como mostra a Tabela 1.

Além dos recursos já mencionados, também fizemos uso do software Stellarium como um conceito de Objeto Virtual de Aprendizagem (OVA). Tal ferramenta utiliza modelagem de fenômenos astronômicos através de um banco de dados de imagens, contendo estrelas, planetas, constelações, cometas etc. O software nos possibilita simular o céu a partir de três dimensões, estabelecendo uma realidade próxima àquela de um observador a olho nu e/ou por telescópios [26]. Em algumas interações, utilizamos o Stellarium para realizar simulações do céu nas quais é possível explorar diversas culturas e tradições.

Na Figura 3, por exemplo, é possível observar a representação da constelação do Homem Velho (Tuya'i), um conhecimento proveniente de tribos indígenas brasileiras, que atribuem a ela mitos utilizados para marcar o início e o final de um fenômeno, como o "início" do verão para os grupos Guarani. Essa constelação pode ser observada no início da noite entre os meses de dezembro e março no hemisfério sul [27]. Já a Figura 4 mostra o mesmo agrupamento de estrelas, porém sob a perspectiva da cultura ocidental, influenciada pelas civilizações Grega e Islâmica. Essas constelações da cultura ocidental atualmente fazem parte das constelações oficiais estabelecidas pela União Astronômica Internacional (UAI). Vale ressaltar que o Stellarium permite que os alunos e inte-



Figura 5: Representação artística da tirinha Uma noite no Sertão - Astronomia e Cultura através de versos e xilogravuras.

ressados nesse tema se envolvam em uma história que explora os conceitos científicos e culturais, potencializando a imaginação e o interesse. Dessa forma, podemos considerar o software Stellarium como um OVA que possibilita explorar diferentes aspectos da Astronomia [26].

Podemos ainda destacar uma das tirinhas produzidas, que propõe a inserção de temáticas relacionadas à cultura local nordestina, como a poesia e o cordel com xilogravuras, conforme apresentada na Figura 5. Esse material mostra o fascínio de artistas e da população local pelos astros, especialmente a “Dama de prata”- o nosso satélite natural, a Lua. Além disso, todas as tirinhas foram elaboradas didaticamente, com uma linguagem acessível, independente das idades, e ilustrações condizentes com o enredo proposto.

Em relação ao processo de extração e análise dos dados através da rede social, é possível observar, na Figura 6, um exemplo referente a vários dados coletados no período de 2020 a 2021, em um acompanhamento realizado a partir da rede social Instagram com a ferramenta Insights, que é responsável por gerar, de forma automática, informações e interações feitas pelos internautas.

Pode-se observar a porcentagem de pessoas por gênero que acompanha o projeto. Além disso, através do tópico “Períodos mais ativos”, observamos que as interações em nossas publicações se concentravam em três intervalos principais: das 9h às 12h, das 12h às 15h, e após as 18h, o que possibilitou a elaboração de materiais para serem

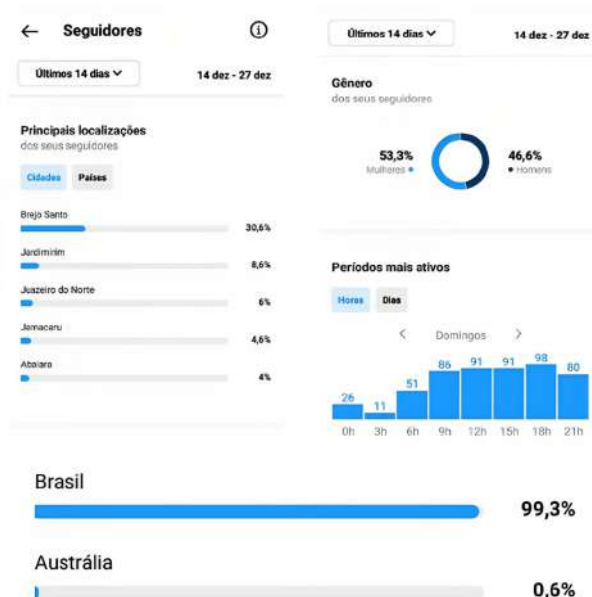


Figura 6: Extrato de informações a partir da ferramenta Insights da rede social - exemplo de dados extraídos automaticamente da plataforma referentes aos dias 14 a 27 de dezembro de 2021.

divulgados durante tais períodos, objetivando alcançar uma maior interação do público.

A distribuição percentual, por faixa etária, dos 224 seguidores no período de 14 a 27 de dezembro de 2021 foi a seguinte: jovens com idade entre 18 e 24 anos, 43,3%; entre 25 e 34 anos, 29,3%; entre 35 e 44 anos, 16%; entre 13 e 17 anos, 4,6%; entre 45 e 54 anos, 3,3%; e entre 55 e 65 anos ou mais, 3,3%. Esses dados fornecem evidências significativas de que o público mais interativo é majoritariamente jovem. Além disso, na Figura 6, é possível observar não apenas a interação de um público nacional, mas também internacional. Isso mostra o amplo alcance que uma rede social pode ter ao disseminar conhecimento científico em linguagem acessível, além de despertar a curiosidade e o interesse de um público ainda maior.

Vale destacar que a prática da divulgação científica irá incentivar mais jovens, instituições de ensino e educadores a se engajarem em temáticas astronômicas, promovendo dessa forma o interesse e conhecimento nessa área. Além disso, como uma das características de um projeto de extensão, realizamos algumas visitas em formato virtual a algumas escolas da rede básica, com o objetivo de explorar temáticas relevantes ao ensino de Ciências, Astronomia e conteúdos abor-



Figura 7: Registro de uma ação de extensão do projeto, realizada de forma remota em uma das escolas estaduais, ano 2021.

dados na Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA).

Em relação a essas ações, a Figura 7 ilustra uma das escolas visitadas pelo projeto, denominada de Escola E, que fica localizada na cidade de Milagres/CE. Durante esses eventos, em formato remoto, são proferidas palestras sobre Astronomia, orientadas por oficinas de baixo custo, bem como realizada a abertura de espaço para interação e respostas a dúvidas dos participantes.

A Tabela 1 apresenta os principais temas discutidos por meio da rede Instagram ao longo dos dois anos da pandemia. Os materiais, conforme mencionado anteriormente, seguem os tópicos temáticos estabelecidos pela BNCC. Todos os temas foram elaborados sequencialmente, buscando sempre estabelecer uma conexão entre a cultura local e a mitologia de diversas sociedades, como os gregos, egípcios e indígenas.

Essa associação tem como objetivo esclarecer o nível de importância e utilidade desses temas em suas respectivas épocas, seja para identificar períodos propícios à lavoura, ritos e festividades, ou ainda para destacar sua relevância na Astronomia contemporânea.

4 Resultados e discussão

Na região do Cariri Cearense, o ensino voltado para as temáticas de Astronomia é realizado de maneira não linear, evidenciando certa instabilidade ao longo do tempo. Observa-se uma ligeira

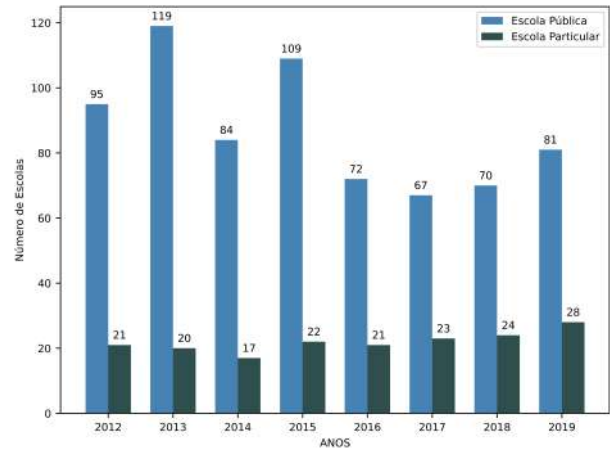


Figura 8: Extrato estatístico de participação das escolas Públicas e Particulares entre os anos de 2012 a 2019, na região do Cariri Cearense.

redução na participação do ensino público, acompanhada por um aumento no setor privado, conforme indicado por dados extraídos da base da Olimpíada Brasileira de Astronomia e Astronáutica (OBA) no período de 2012 a 2019 (representado na Figura 8). Na figura, exibimos o número de escolas públicas e privadas ao longo dos últimos oito anos, categorizando-as com base em sua participação na OBA. Apesar da acentuada redução, conforme evidenciado no gráfico, é possível observar que essas instituições demonstram dedicação em estimular o interesse dos jovens pelo conhecimento científico, refletido no engajamento de seus alunos nessas olimpíadas.

O ensino de temáticas astronômicas tem desempenhado um papel significativo nas instituições de ensino básico [2]. Sua importância é destacada, pois é crucial para a formação dos indivíduos desde os primeiros anos do ensino fundamental. Essas temáticas não apenas transcendem os conteúdos obrigatórios, mas também contribuem para a ampliação do conhecimento crítico de todos os envolvidos. Além disso, facilitam o processo de ensino e aprendizagem, conforme afirmado por Fonseca e Elias (2021) [28].

Outro ponto relevante é que, quando traçamos um raio de até 60 km, tendo como base a sede do nosso instituto, em Brejo Santo, e analisamos com atenção os quatro últimos anos da análise, de 2016 a 2019, percebemos que as participações das escolas em olimpíadas de Astronomia concentram-se em maior parte nas Zonas Urba-

Tabela 1: Temas abordados e quantidade de materiais produzidos, disponível no IG: @obsceukariri

TEMAS	2020	2021
Astronômicos/Fenômenos Físicos	Formação do Sol e planetas; Fases da Lua; Futuro da Terra (Stephen Hawking); Calendários Semanais; Nobel da Física; Lançamentos de Sondas e Satélites; Buracos Negros; Eclipses; Conjunções de Planetas.	Calendários Mensais; Constelações; Sondas e Satélites; Chuvas de Meteoros; Coronavírus do Espaço?; eclipses; Tirinhas astronômicas; Presença Feminina; Instrumentos de observações; Estações durante o Ano; Alongamentos orientais; Mini-Podcast astronômicos.
Culturais/ Mitos	A Lua e a mitologia Inca; Mitos da Antiguidade sobre “estrelas cadentes”; Natal e a Estrela de Belém.	Mitologia Greco-Romana (Constelações); mitologias Indígenas (Constelações); as Festas Juninas e a Astronomia; Astronomia e Poesia; mitologia Grega.
Experimentos/ Oficinas	Experimentos: Fases da Lua; Experimento: As constelações;	Oficina - Jogo da Astronomia: Viagens espaciais, teoria de formação Lunar e Constelações.
TOTAL	27	38

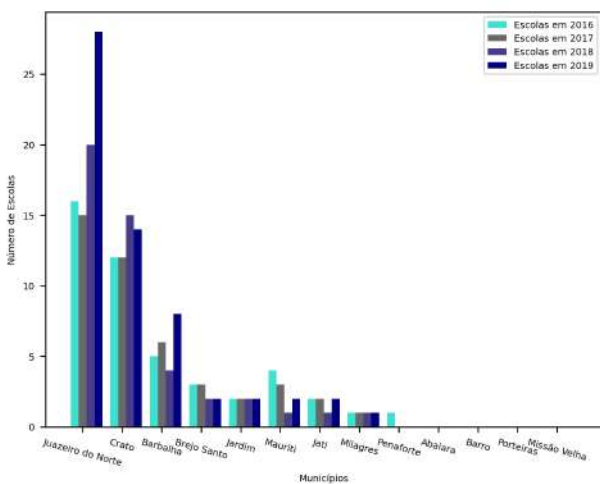


Figura 9: Representação gráfica do número de escolas por município da região do Cariri, para os anos 2016, 2017, 2018 e 2019, com maior participação na OBA.

nas ou na Região Metropolitana do Cariri. À medida que deslocamos o olhar para os demais municípios, é perceptível um decréscimo quanto às participações de escolas da zona rural nas propostas de atividades astronômicas, veja os dados no Figura 9.

Um possível motivo para essa redução pode estar relacionado à falta de estímulo interno bem como de acesso de muitas instituições de ensino básico a centros e/ou instituições que promovem

a divulgação científica, tais como museus de ciências, planetários, observatórios e parques ecológicos, principalmente em razão das grandes distâncias. Com exceção do Museu de Santana do Cariri - Museu de Paleontologia Plácido Cidade Nuvens, localizado a cerca de 130 km da nossa região, todos os outros espaços estão situados a uma distância superior a 400 km da nossa sede.

Diante o panorama desses espaços, é perceptível a contribuição dos centros e institutos para o estímulo da alfabetização científica, especialmente nos campos das ciências e da Astronomia, como salientado por Moreira e Massarani (2002) [9]. Uma vez que a região do Cariri Cearense abrange de um a dois sextos dos estabelecimentos dedicados à promoção da alfabetização científica por meio de estratégias de DC ou popularização científica, salientamos que a ausência destas iniciativas contribui de maneira adversa, dificultando significativamente o processo de AC, e facilita o surgimento do analfabetismo científico, conforme afirmações de Chassot (2003) [14].

Outras condições que também podem influenciar na baixa participação e/ou fomento à Astronomia observada na Figura 9 são: a falta de condições sociais, econômicas e locais; baixa infraestrutura das instituições básicas, tais como, a falta de equipamentos para a abordagem de temáticas astronômicas; baixa condição salarial para

os profissionais de ensino, motivando o docente a atuar em mais de uma instituição e com pouco tempo dedicado às atividades de planejamento, o que leva ao ensino tradicional, de acordo com Sousa, Calvacanti e Pino (2021) [15]. Por último, ressaltamos também uma possível deficiência na formação ao nível de graduação e/ou continuada de professores de ensino básico da região, levando a abordagens “tímidas” dessas temáticas dentro e fora das salas de aula, assim como destacado por Ferreira e Meghioratti (2008) [29].

Essas condições nos levam a refletir sobre a necessidade de intensificar iniciativas de extensão, pesquisa e possivelmente desenvolver novos estabelecimentos de DC (como planetários móveis e/ou fixos, museus e centros de Ciências). O objetivo dessas iniciativas seria promover uma educação acessível à população local, tanto nas escolas de ensino básico quanto nas instituições de ensino superior, com foco especial na região do Cariri Cearense.

Dessa forma, somos incentivados a adotar a divulgação científica, em conjunto com o projeto de extensão, para permitir uma ponte entre os conhecimentos já existentes com aqueles presentes no ambiente acadêmico, sobretudo com o nosso público-alvo, para incentivar a participação de novas escolas e, conseqüentemente, novos alunos, tanto no universo das ciências quanto nas mais diversas olimpíadas. Como consequência, o conhecimento é espalhado em diversos formatos, sobretudo no que diz respeito à utilização de redes sociais, como o Instagram, uma ferramenta alternativa usada no período pandêmico para incentivar o interesse pela ciência e Astronomia.

Além desse fato, a possibilidade de uma ponte entre os conhecimentos pré-existentes não ocorre somente através dos projetos de extensão, mas também através dos projetos de pesquisa. Segundo Scheidemantel, Klein e Teixeira (2004) [30], a extensão e a pesquisa são ferramentas essenciais para articular a Universidade como produto, resultante da intervenção conjunta desses dois instrumentos. Essa integração visa aproximá-las ao máximo das aplicações práticas na sociedade, impulsionando a formação do cidadão, tanto dentro quanto fora de seus limites institucionais.

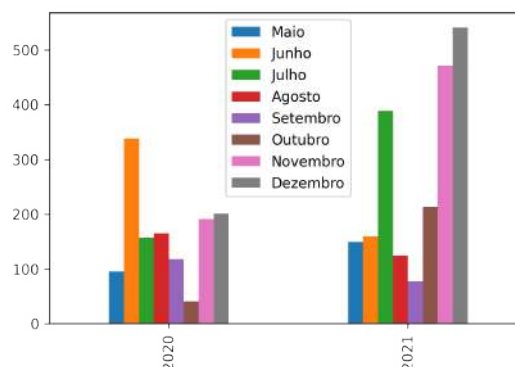


Figura 10: Representação gráfica referente aos alcances dos Conteúdos realizado pelos internautas no Instagram em 2020 e 2021.

4.1 A divulgação científica através do Instagram

Do ponto de vista quantitativo, dentre os vários materiais audiovisuais desenvolvidos e vinculados à nossa página, conseguimos monitorar as interações dos internautas, através do Alcance dos Conteúdos - interações mediante “curtidas”, visualizações dos materiais e repostagem nos *stories* durante os meses de maio a dezembro, período de vigência do projeto, nos anos de 2020 e 2021, como mostra a Figura 10. Com isso foi possível mapear estatisticamente que o público interessado na temática, através da rede social, em sua maioria é composto por pessoas na faixa etária de 18 a 24 anos. Cerca de 46,6% são homens e 53,3% são declarados do gênero feminino.

É uma realidade que, desde o final do século XX, temos observado um aumento constante do interesse do público feminino em diversas áreas de Ciência e Tecnologia (C&T) [31]. Essa tendência também se manifesta em nosso projeto divulgado no Instagram, onde mais da metade dos participantes se identifica como do gênero feminino. Isso sugere evidências de interesse em conteúdos astronômicos e nas ciências naturais, especialmente em Física, conforme ilustrado na Figura 6. Diante disso, surge a necessidade de questionar os fatores que podem influenciar a participação ou formação delas nesse campo. Seriam questões econômicas, sociais ou uma desmotivação ocorrida durante o ensino básico? Tais questionamentos persistem e devem ser objeto de novos estudos, buscando uma maior inclusão e representatividade feminina nas

áreas de Ciências, especialmente na Física e Astronomia.

Também foi possível inferir, através de *insights* coletados da rede social, que o alcance geográfico do projeto, tendo como referência a cidade de Brejo Santo (sede do IFE/UFCA), ultrapassa um raio de 300 km. Contudo, devido à abrangência da rede social, também foram obtidas interações provenientes de diferentes partes do Brasil e, em algumas ocasiões, até mesmo, do mundo, como ilustrado na Figura 6. Essa observação nos leva a especular sobre o grande potencial das redes sociais como uma ferramenta capaz de fomentar a divulgação científica e promover o interesse por Ciência e Astronomia.

4.2 Prós e contras das metodologias utilizadas na difusão da Astronomia

Observamos que a metodologia ativa, permite uma crescente possibilidade de interações, entre indivíduos de diversas áreas, contextos sociais, econômicos, culturais e institucionais, contribuindo, desta forma, no fomento de diversos conteúdos pertinentes à ciência e Astronomia. Desta forma, os conteúdos explorados nas ações podem ser utilizados facilmente no auxílio à construção de uma aula mais envolvente, tanto para o nível fundamental quanto para o ensino médio, abordando temáticas de Ciências e Matemática, além de outras áreas do conhecimento, visto que a Astronomia é uma área naturalmente interdisciplinar. Lembramos que se compreende como interdisciplinar toda ou qualquer área que consiga fazer uma ligação com outras disciplinas, objetivando solucionar ou explicar um problema [32].

Ainda em relação aos materiais desenvolvidos e disseminados por meio do Instagram, além de abordar diversas temáticas de forma mais acessível, também possibilita minimizar alguns equívocos edificados a partir do “conhecimento tradicional”, contribuindo ainda na alfabetização científica por meio da DC. Isto ainda permite aos cidadãos do Cariri Cearense e de outras regiões não centrais uma alternativa de discutir e questionar os seus próprios conceitos sobre temas relacionados à Astronomia e Ciências afins, além dos muros da universidade.

Isso se deu mediante a utilização estratégica da rede social Instagram, que foi empregada com

o propósito de intervir no processo de ensino-aprendizagem dos conteúdos planejados de forma sistemática e sequencial, por meio de reuniões de formação que contavam com a participação dos integrantes do projeto, incluindo bolsistas/discentes e coordenadores. Dessa maneira, essas interações deixam de ser simples oportunidades de atividades educacionais não-formais e informais, de complementação ou de lazer, para se tornarem elementos ativos na promoção da educação em ciências, com destaque para à Astronomia, conforme anteriormente enfatizado por Langhi e Nardi (2010) [11].

Em relação às propostas de extensão, pode-se ressaltar, com base nas observações realizadas durante as reuniões de formação dos integrantes do projeto, principalmente nos anos de 2020 e no primeiro semestre de 2021, a resistência por parte das escolas públicas em realizar os encontros remotos. Acredita-se que alguns dos motivos estejam relacionados à falta de formação de professores das instituições de ensino básico ao contexto vivenciado; assim como dos alunos por não terem as ferramentas necessárias, como notebooks, celulares ou até mesmo as condições sociais e econômicas suficientes para terem acesso à rede de internet.

Além disso, e com caráter formativo, os encontros remotos estabelecidos com instituições de ensino básico permitem ao extensionista, uma simulação prévia de uma sala de aula, capacitando-o tanto para o futuro estágio supervisionado quanto para sua atuação definitiva no magistério.

5 Conclusão

De maneira geral, o papel do Instagram na divulgação científica de Astronomia tem contribuído significativamente para tornar essa ciência mais acessível e atrativa para o público em geral. A combinação única de imagens envolventes, informações concisas e recursos interativos torna o Instagram uma escolha natural para quem deseja começar a aprender sobre Astronomia e manter-se atualizado sobre os significativos avanços da ciência para o campo educacional.

Dessa forma, ao utilizar o Instagram em conjunto como nosso projeto de extensão durante o período de pandemia, conseguimos parcialmente

alcançar um de nossos objetivos: contribuir para minimizar o analfabetismo científico em relação a temas de ciência e Astronomia. Isso ocorre porque a alfabetização científica é um processo contínuo que requer a atuação de educadores, a fim de promover uma ampla disseminação do conhecimento à medida que a ciência avança. Esse processo contribui para a formação de cidadãos críticos, capazes de interpretar sua realidade e compreender os diversos fenômenos naturais ao seu redor.

Através deste estudo, também constatamos uma predominância da participação feminina em nossas postagens e visualizações nos materiais, o que reflete a crescente presença das mulheres no campo das ciências e tecnologias. Além disso, a divulgação científica, por meio de palestras e ações de extensão relacionados à Astronomia, desempenha um papel fundamental ao despertar o interesse, apreciação e a aproximação do público em relação à ciência como um todo. Isso resulta em uma maior conscientização e capacidade crítica das pessoas diante dos modelos e padrões impostos pela sociedade.

Em relação ao alcance do projeto, as redes sociais têm um potencial significativo em termos de amplitude geográfica, permitindo a divulgação e disseminação da nossa temática de Astronomia para um público bastante amplo e heterogêneo. Além disso, o Instagram atuou como ferramenta facilitadora de interação entre pessoas de diversas regiões do nosso país e de outros países. Diante disso, reforçamos a importância da continuação e aprimoramento da divulgação científica por meio das redes sociais para promover conteúdo de qualidade e linguagem acessível à população do Cariri Cearense, assim como de outras regiões. Por fim, vale destacar que os temas científicos, principalmente os astronômicos, podem naturalmente competir por espaço no universo dinâmico das redes sociais. Para tanto, é fundamental que continuemos a produzir materiais de qualidade e sempre utilizar uma linguagem acessível.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Pró-reitoria de Extensão (PROEX) da Universidade Federal do Cariri (UFCA) pelo apoio e concessão de bolsas durante

os anos de vigência e atuação do projeto.

Sobre os autores

Claudio do Nascimento Souza (claudio.souza@aluno.ufca.edu.br) possui graduação Interdisciplinar em Ciências Naturais e Matemática (Licenciatura) pelo Instituto de Formação de Educadores (IFE) da Universidade Federal do Cariri (2022) e atualmente é graduando no curso de Física (Licenciatura) na mesma instituição e bolsista do Planetarium Kariri.

Tharcísyo Sá e Sousa Duarte (tharcisyo.duarte@ufca.edu.br) possui graduação em Física (Bacharelado) pela Universidade Federal da Paraíba (2010), mestrado em física (Astrofísica) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2012) e doutorado em física (Astrofísica) também pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2016). Tem experiência na área de Astronomia, com ênfase em Astrofísica Estelar, atuando principalmente nos seguintes temas: magnetismo estelar, espectroposcopia, espectropolarimetria, abundâncias químicas, estrelas análogas solares e gêmeas solares. Atualmente é professor adjunto dos cursos de Licenciatura em Física e Licenciatura Interdisciplinar em Ciências Naturais e Matemática do Instituto de Formação de Educadores da Universidade Federal do Cariri e Coordenador do Planetarium Kariri.

Gilson Francisco de Oliveira Junior (gilson.francisco@ufca.edu.br) possui graduação em Física (Bacharelado) pela Universidade Federal da Paraíba (2009), mestrado em Física pela Universidade Federal da Paraíba (2012), doutorado em Física pela Universidade Federal da Paraíba (2016) e pós-doutorado pela Universidade Federal da Paraíba (2017). Atuando principalmente nos seguintes temas: circuitos eletrônicos, caos, sincronismo. Atualmente é professor adjunto dos cursos de Licenciatura em Física e Licenciatura Interdisciplinar em Ciências Naturais e Matemática do Instituto de Formação de Educadores (IFE) da Universidade Federal do Cariri e coordenador adjunto do Planetarium Kariri.

Jefferson Soares da Costa (jefferson.costa@ufrn.br) possui graduação em Física (Bacharelado) pela Universidade Federal do Rio

Grande do Norte (2006), mestrado e doutorado em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pós-doutorado na Université Toulouse III, Paul Sabatier. Têm experiência em astrofísica estelar, com ênfase no estudo de rotação estelar, abundâncias químicas e magnetismo estelar. Atualmente é professor adjunto da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e Coordenador do Mestrado Nacional em Ensino de Física - Polo 51.

Milene Rodrigues Martins (milene.martins@uffs.edu.br) possui graduação em Física (Licenciatura) pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (2013). Mestre (2016) e Doutora (2020) em Educação para a Ciência e a Matemática pela Universidade Estadual de Maringá. Atualmente é professora adjunta do Departamento de Física da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) - Campus Realeza e membro do Grupo de Pesquisa em Ensino de Física (GPEF-UFS). Tem interesse em pesquisas voltadas para o Ensino da Cosmologia Contemporânea, História da Física, História e Filosofia da Ciência, Estágio Supervisionado e Formação de Professores.

Referências

- [1] T. M. M. Saldanha et al., *Ensino não formal, informal e divulgação da Astronomia: Contribuições de um grupo de estudos*, [Revista Latino-Americana De Educação Em Astronomia](#). (35), (35), 41 (2023).
- [2] E. C. Junior et al., *Divulgação e ensino de Astronomia e Física por meio de abordagens informais*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **40**(4), 1 (2018).
- [3] H. M. F. Pivetta et al., *Ensino, pesquisa e extensão universitária: em busca de uma integração efetiva*, [Linhas Críticas](#) **16**(31), 377 (2010).
- [4] M. D. Longhini, H. A. Gomide e T. C. D. Fernandes, *Quem somos nós? Perfil da comunidade acadêmica brasileira na educação em astronomia*, [Ciência & Educação](#). **19**(3), 739 (2013).
- [5] D. C. Oliveira et al., *Metodologias ativas no ensino de ciências da natureza: significados e formas de aplicação na prática docente*, [# Tear: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia](#) **9**(2), 1–15 (2020).
- [6] S. Albagli, *Divulgação científica: informação científica para a cidadania*, [Ciência da Informação](#) **25**(3), 396 (1996).
- [7] J. Caldas e L. C. B. Crispino, *Divulgação científica na Amazônia: O Laboratório de Demonstrações da UFPA*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **39**(2), 01 (2017).
- [8] M. G. Germano e W. A. Kulesza, *Popularização da Ciência: uma revisão Conceitual*, [Cad. Bras. Ens. Fís.](#) **24**(1), 7 (2007).
- [9] I. Moreira e L. Massarani, *As primeiras iniciativas de divulgação científica no Brasil* (Centro Cultural de Ciência e Tecnologia da UFRJ, Rio de Janeiro, 2002), 44–64.
- [10] I. d. C. Moreira e L. Massarani, *A divulgação científica no Rio de Janeiro: algumas reflexões sobre a década de 1920*, [História, Ciências, Saúde-Manguinhos](#) **7**(3), 627 (2001).
- [11] R. Langhi e R. Nardi, *Ensino da astronomia no Brasil: educação formal, informal, não formal e divulgação científica*, [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) **31**(4), 4402 (2009).
- [12] R. B. Menegusse, T. R. C. Silva e F. T. Gomes, *Divulgação Científica: o uso de redes sociais para divulgação de trabalhos acadêmicos*, [ANALECTA](#). **7**(2), 1 (2021).
- [13] M. C. Leal e G. Gouvêa, *Narrativa, Mito, Ciência e Tecnologia: O ensino de ciências na escola e no museu*, [Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências \(Belo Horizonte\)](#) **2**(1), 5 (2000).
- [14] A. Chassot, *Alfabetização científica: uma possibilidade para a inclusão social*, [Revista Brasileira de Educação](#) (22), 89 (2003).
- [15] F. J. F. Sousa, L. V. S. Cavalcante e J. C. D. Pino, *Alfabetização científica e/ou letramento científico: reflexões sobre o Ensino de Ciências*, [Revista Educar Mais](#) **5**(5), 1299 (2021).

- [16] D. Franco Carvalho Jacobucci, *Contribuições dos espaços não-formais de educação para a formação da cultura científica*, *Revista Em Extensão* **7**(1), 55 (2008).
- [17] Convenção Sobre Diversidade Biológica, *Conhecimentos Tradicionais*, traduzido por Carlos Potiara Castro (2012). Disponível em <https://www.cbd.int/abs/infokit/revised/web/factsheet-tk-pt.pdf>, acesso em out. 2022.
- [18] C. Sagan, *Cosmos* (Companhia das Letras, São Paulo, 2017), 487.
- [19] C. J. Martinazzo, T. M. Martins e S. P. Silva, *A Religação dos Saberes a Partir da Série Cosmos, de Carl Sagan*, *Revista Contexto & Educação* **33**(104), 151 (2018).
- [20] J. L. Fernandes e S. C. M. Santos, *Redes Sociais e Divulgação Científica: Possibilidades para socialização do conhecimento*, *Anais V FIPED* (2013). Disponível em <https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/3709>, acesso em set. 2024.
- [21] Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação, *Pesquisa TIC Kids Online Brasil 2021 - Resumo Executivo* (2021). Disponível em https://cetic.br/media/docs/publicacoes/2/20221121120628/resumo_executivo_tic_kids_online_2021.pdf, acesso em set. 2024.
- [22] P. R. G. Silva Filho e M. L. Galluzzi, *A utilização de redes sociais para a divulgação científica e ensino de Astronomia*, *Revista de Enseñanza de la Física* **33**(2), 259 (2021).
- [23] T. D. F. F. Rodrigues, G. S. Oliveira e J. A. Santos, *As Pesquisas Qualitativas e Quantitativas na educação*, *Revista Prisma* **2**(1), 154 (2021). Disponível em <https://revistaprisma.emnuvens.com.br/prisma/article/view/49>, acesso em set. 2024.
- [24] A. C. Gil, *Como elabora projeto de Pesquisa* (Atlas, São Paulo, 2002).
- [25] Brasil, *Base Nacional Comum Curricular*. Disponível em <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/abase/#fundamental/ciencias>, acesso em out. 2022.
- [26] R. B. Domingos e R. R. P. Teixeira, *Uso do software Stellarium em atividades de ensino de astronomia*, *Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada* **8**(1), 30 (2021).
- [27] P. H. Colonese e U. D. Pimental, *Céus astro-culturais: o Homem Velho, o Tatu, o Morcego e Primeiro Grande com Pegada do Coelho*, vol. 2 (Rio de Janeiro: Fiocruz – COC, 2021).
- [28] M. O. Fonseca e M. A. Elias, *E onde está a astronomia? Análise do Ensino de Astronomia no ensino médio com base nos documentos nacionais*, *Arquivos do Mudi* **25**(1), 26 (2021).
- [29] D. Ferreira e F. A. Meghioratti, *Desafios e possibilidades no ensino de Astronomia*, *Cadernos PDE*, 1–17 (2008).
- [30] S. E. Scheidemantel, R. Klein e L. I. Teixeira, *A Importância da Extensão Universitária: o Projeto Construir*, in *Anais do 2º Congresso Brasileiro de Extensão Universitária, Área Temática Direitos Humanos* (2004). Disponível em <https://www.ufmg.br/congrext/Direitos/Direitos5.pdf>, acesso em set. 2024.
- [31] C. S. Fernandes, R. P. Sousa e M. S. Melo, *Meninas na Ciência: A representatividade Feminina nas áreas de Ciência e Tecnologia em prol da equidade dos Gêneros*, in *Anais da IX Jornada de Iniciação Científica e Extensão, Instituto Federal do Tocantins* (2018). Disponível em <https://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/jice/9jice/paper/viewFile/9424/4233>, acesso em set. 2024.
- [32] A. C. T. Piovezan e L. D. Gama, *Astronomia e Matemática: uma proposta interdisciplinar para o Ensino Fundamental II*, *Educação Por Escrito* **10**(1), 32716 (2019).

A lei de expansão do universo: tradução do artigo seminal de Georges Lemaître

Júlio C. Fabris¹ e Oliver F. Piattella²

¹Universidade Federal do Espírito Santo

²Università degli Studi dell’Insubria, Itália

Resumo

É apresentada a tradução do artigo de Georges Lemaître de 1927 que propôs a lei que relaciona a velocidade de recessão cósmica das galáxias com a distância que elas se encontra de nós, lei de Hubble-Lemaître.

Abstract

The translation of Georges Lemaître’s 1927 article is presented, which proposed the law that relates the speed of cosmic recession of galaxies with their distance from us, the Hubble-Lemaître law.

Palavras-chave: Georges Lemaître, lei de Hubble-Lemaître, expansão do universo.

Keywords: Georges Lemaître, Hubble-Lemaître law, expansion of the universe.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.46118](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.46118)

1 Introdução

Um dos resultados mais importantes da cosmologia moderna foi obtido no início dos anos 20, estabelecendo como as galáxias se afastam de nós, sendo a velocidade de afastamento proporcional à distância que elas se encontram de nós. Este resultado é crucial para a construção do atual modelo cosmológico padrão. Ele foi primeiramente obtido pelo físico (e padre) belga Georges Lemaître em um artigo publicado em 1927. Seria posteriormente reobtido pelo astrônomo americano Edwin Hubble. A lei que rege este comportamento é conhecida hoje como *lei de Hubble-Lemaître*. O artigo original de Lemaître é frequentemente citado hoje, mas raramente reproduzido. Apresentamos abaixo o que é provavelmente a primeira tradução deste artigo para o português.

Georges Lemaître nasceu em 1894 em Charleroi, Bélgica. Quando a Primeira Guerra Mundial eclode, em 1914, Lemaître tem 20 anos, sendo convocado, servindo na artilharia, e recebendo condecorações por bravura. Em 1920 se graduou em Física pela *Université Catholique de Louvain*. Três anos depois se ordenaria padre, mas conti-

nuaria a se dedicar à Física e Astronomia.

Em 1927 ele publica o artigo cuja tradução é apresentada a seguir, no qual ele formula a ideia de um universo em expansão obedecendo ao que é conhecido hoje como *Lei de Hubble-Lemaître*. Ela estabelece que a velocidade de recessão das galáxias é proporcional à distância em que se encontra a galáxia. A constante de proporcionalidade é H_0 , a constante de Hubble. Matematicamente, esta lei se expressa sob a forma

$$v = H_0 r, \quad (1)$$

sendo v a velocidade de recessão da galáxia e r sua distância até nós. A velocidade de recessão é medida pelo efeito Doppler devido à expansão do universo (o que é bem claramente explicado no artigo de Lemaître) e r por algum indicador de distância como, por exemplo, pela medida do período de variação de luminosidade das estrelas Cefeidas observadas nesta galáxia.¹ Obviamente, H_0 tem dimensão de inverso do tempo, e no

¹Sobre as estrelas Cefeidas como indicadores de distância, ver D.I. Machado, *As estrelas Cefeidas enquanto velas-padrão: a relação período-luminosidade tal qual apresentada por sua descobridora*, Cadernos de Astronomia **2**(2), 170 (2021).

modelo cosmológico padrão a idade do universo T_0 pode ser estimada por $T_0 \sim 1/H_0$. Nesta forma, a lei de Hubble-Lemaître é válida para galáxias próximas à nossa, mas ela pode ser também extrapolada para galáxias distantes. A lei de Hubble-Lemaître é um dos pilares da cosmologia moderna e uma expressão eloquente da expansão do universo.

Lemaître aplica a lei de expansão do universo aos dados disponíveis na época encontrando um valor para a constante de Hubble de 625 km por segundo por Mpc (o valor moderno fica em torno de 70).² Esse resultado foi obtido com dois anos de antecedência (em 1927) em relação ao trabalho do astrônomo estadunidense Edwin Hubble, publicado em 1929 onde é também é apresentada a relação entre a velocidade de recessão das galáxias e sua distância até nós.³ Apesar disso, a famosa lei que descreve a expansão do universo carregou por muito tempo apenas o nome de Hubble. Somente em 2018 foi proposto de mudar o nome para lei de Hubble-Lemaître, com o fim de homenagear o trabalho do físico belga. No entanto, H_0 continua sendo denominada de *constante de Hubble*.

Porque não foi imediatamente dado crédito ao trabalho do Lemaître e teve-se que esperar tanto anos para o reconhecimento de sua contribuição fundamental para o estabelecimento da lei que descreve a recessão das galáxias? Talvez pelo fato da revista onde o artigo foi publicado (*Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*) não ser de ampla circulação no meio da Física e Astronomia? Possivelmente este é o motivo principal. No entanto, o fato do artigo ter sido publicado em francês pode também ter desempenhado um papel para que o artigo fosse pouco conhecido: mesmo que a ciência utilizasse na época com frequência outras línguas além do inglês, a astronomia era fortemente dominada no início do século XX por cientistas anglo-saxões e nem todos, provavelmente, tinham familiaridade

com o francês.

Vale ressaltar que uma tradução do trabalho para o inglês foi feita pelo próprio Lemaître em março 1931,⁴ mas, por algum motivo, a parte contendo a estimativa da constante de Hubble foi omitida. Uma possibilidade é que Lemaître considerou irrelevante estes parágrafos pois novos dados haviam aparecido na literatura tornando obsoletas algumas estimativas feitas na versão em francês de 1927. Deve-se salientar, no entanto, que mesmo com a omissão destes parágrafos na tradução para o inglês, a lei que rege a relação entre velocidade de recessão e distância das galáxias está claramente formulada. A decisão da IAU de incluir o nome de Lemaître, ao lado do de Hubble, corrige uma evidente injustiça.

A tradução do artigo de 1927 que apresentamos mostra a profunda compreensão que Lemaître tinha da teoria da Relatividade Geral e dos problemas da Astronomia, tanto do ponto de vista teórico quanto observacional. Curiosamente, no entanto, ele não faz referência ao artigo de 1922 de Alexander Friedmann, o primeiro a propor o cenário de um universo em expansão.⁵ Lemaître parece apresentar sua proposta de um cenário de universo com *raio* dependente do tempo, conciliando aspectos das soluções de Einstein (universo estático) e de de Sitter (universo vazio, mas com constante cosmológica, em expansão) como uma novidade. O motivo desta omissão é pouco claro, já que Friedmann publicou seu artigo, em alemão, em uma das principais revistas da época, *Zeitschrift der Physik*.

Além do artigo traduzido a seguir, as contribuições científicas de Lemaître foram muitas. Ele formularia a proposta que o universo se iniciaria de um *átomo primitivo*, cuja desintegração geraria a expansão do universo. O artigo contendo essa proposta foi traduzido e comentado

²O Mpc, *megaparsec*, é uma unidade de medida de distância tipicamente usada em astrofísica e corresponde aproximadamente a 3 milhões de anos-luz.

³E. Hubble, *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, Proc. Nat. Acad. Sci. **15**, 168-173 (1929).

⁴G. Lemaitre, *A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius accounting for the Radial Velocity of Extra-galactic Nebulae*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **91**(5), 483-490 (1931).

⁵Ver tradução e comentários em H. Velten e W. Zimdahl, *O universo dinâmico de Friedmann: tradução do artigo seminal de Friedmann*, Cadernos de Astronomia **3**(1), 151 (2022).

em edição anterior dos Cadernos de Astronomia.⁶

Lemaître também abordaria a questão dos buracos negros, tendo sido um dos primeiros a perceber as sutilezas da solução de Schwarzschild. Ainda na década de 30, ele alertou para a necessidade de se introduzir a constante cosmológica nas equações cosmológicas de maneira a evitar o cenário onde o universo seria mais jovem que alguns dos seus constituintes, como aglomerados globulares, em especial. Ele também abordou

o problema do colapso gravitacional gerando objetos compactos relativistas.

Lemaître faleceu em 1966. O principal da sua contribuição científica foi feito antes da Segunda Guerra Mundial, mas ele permaneceu cientificamente ativo até o final de sua vida.

⁶F. T. Falciano e J. C. Fabris, *A hipótese do átomo primordial de Georges Lemaître*, Cadernos de Astronomia 4(2), 165 (2023).

Um universo homogêneo de massa constante e raio crescente, explicando a velocidade radial das nebulosas extra-galácticas¹

Nota do Sr. Abbé G. Lemaître

1 Generalidades.

A teoria da Relatividade Geral prevê a existência de um universo homogêneo onde não somente a distribuição de matéria é uniforme, mas também todas as posições no espaço são equivalentes: não existe um centro de gravidade. O raio R do espaço é constante, o espaço é elíptico de curvatura positiva uniforme $1/R^2$, as retas saindo de um mesmo ponto passam novamente pelo ponto de partida depois de um percurso igual a πR , o volume total do espaço é finito e igual a $\pi^2 R^3$,² as retas são linhas fechadas que percorrem o espaço todo sem encontrar fronteiras.³

Duas soluções têm sido propostas. Aquela de DE SITTER ignora a presença da matéria e supõe sua densidade ser nula. Essa solução conduz a algumas dificuldades de interpretação sobre as quais teremos ocasião de retornar, mas seu grande interesse é de explicar o fato que as nebulosas extra-galácticas parecem fugir de nós com uma velocidade enorme, como uma simples consequência das propriedades do campo de gravitação, sem supor que nós nos encontramos num

¹Título original: *Un universe homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale de nébuleuses extra-galactiques*. Publicado em: *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, A47, p. 49-59. Traduzido por Júlio C. Fabris e Oliver F. Piattella.

²[N.d.T] Esse valor do volume poderia criar confusão, então vale a pena incluir aqui uma pequena explicação. Sabe-se que num espaço euclidiano em 3 dimensões, a área de uma superfície esférica bidimensional de raio R é de $4\pi R^2$ e o volume contido nela é de $4\pi R^3/3$. Porém, num espaço euclidiano em 4 dimensões uma superfície esférica de raio R é tridimensional, sua área é $2\pi^2 R^3$ e o volume contido nela é $\pi^2 R^4/2$. O espaço-tempo tem 4 dimensões, mas não é euclidiano. Apesar disso, podemos mesmo assim usar o valor $2\pi^2 R^3$ para a superfície esférica tridimensional. Por fim, Lemaître usa o valor $\pi^2 R^3$ ao invés de $2\pi^2 R^3$, pois usa uma geometria elíptica em que os pontos antipodais são identificados (como ele mesmo especifica na nota de rodapé) e chama esse valor de volume, e não de área, pois é proporcional a R^3 .

³Consideramos o espaço simplesmente elíptico, ou seja, sem antípodas.

ponto do universo dotado de propriedades especiais.

A outra solução é a de EINSTEIN. Essa leva em conta o fato evidente de que a densidade da matéria não é nula e ela conduz a uma relação entre esta densidade e o raio do universo. Esta relação prediz a existência de massas enormemente maiores de todas as conhecidas, uma vez que tem sido comparada pela primeira vez com as observações. Estas massas foram descobertas depois que as distâncias e as dimensões das nebulosas extra-galácticas puderam ser estabelecidas. O raio do universo calculado a partir da fórmula de Einstein é, segundo dados recentes, algumas centenas de vezes maior que a distância dos objetos mais longínquos fotografados pelos nossos telescópios.⁴

As duas soluções possuem então suas vantagens. Uma está de acordo com a observação das velocidades radiais das nebulosas, a outra toma em conta a presença da matéria e fornece uma relação satisfatória entre o raio do universo e a massa que ele contém. Parece desejável obter uma solução intermediária que poderia combinar as vantagens de cada uma delas.

A primeira vista, tal solução intermediária não existe. Um campo de gravitação estático e com simetria esférica só admite duas soluções, a de Einstein e a de de Sitter, isto para o caso em que a matéria seja homogeneamente distribuída e não esteja submetida a nenhuma pressão ou tensão interna. O universo de de Sitter é vazio, e o de Einstein, de sua parte, pode conter tanta matéria quanto se queira. É surpreendente que a teoria não possa fornecer nenhuma configuração intermediária entre estes dois extremos.

O paradoxo pode ser compreendido quando se considera que a solução de de Sitter não responde a todas as necessidades do problema.⁵ O espaço

⁴E. P. Hubble, *Extragalactic nebulae*, *Astrophys. J.* **64** (1926), 321-369.

⁵Cf. K. Lanczos, *Bemerkung zur de Sitterschen Welt*, *Phys. Zeitschr.* **23** 539 (1922) e H. Weyl, *Zur allgemeinen Relativitätstheorie*, *Id* **24**, 230(1923). Nós seguimos aqui o ponto de vista de Lanczos. As linhas de universo das nebulosas formam um feixe de centro ideal e de hiperplano axial real. O espaço normal a estas linhas de universo é formado por hipersferas equidistantes ao plano axial. Este espaço é elíptico, seu raio variável sendo mínimo no instante correspondente ao plano axial. Na hipótese de Weyl, as linhas de universo são paralelas no passado; as hipersuperfícies normais representando o espaço são horosferas, e a geometria do espaço é, então, euclideana. A

é homogêneo, de curvatura positiva constante; o espaço-tempo é também homogêneo, todos os pontos são perfeitamente equivalentes; mas a divisão em espaço e tempo não respeita mais a homogeneidade. As coordenadas escolhidas correspondem a um centro sem equivalente na realidade. Um ponto imóvel no centro descreve uma geodésica do universo, enquanto um ponto imóvel em qualquer outro lugar não descreve uma geodésica do universo. A escolha do sistema de coordenadas destrói a homogeneidade que existia na formulação do problema e daí surgem os resultados paradoxais que aparecem no “horizonte” do centro. Quando se introduz coordenadas e uma divisão correspondente do espaço e do tempo respeitando a homogeneidade do universo, encontra-se que o campo gravitacional não é mais estático. Obtém-se um universo semelhante ao de Einstein mas onde o raio espacial em vez de permanecer invariável, varia com o tempo segundo uma lei particular.⁶

distância entre as nebulosas aumenta à medida que as geodésicas paralelas que elas descrevem se afastam umas das outras proporcionalmente a e^{tR} , onde t é o tempo próprio e R o raio do universo. O efeito Doppler é igual a r/R , onde r é a distância à fonte no instante de observação. Cf. G. Lemaître, *Note on de Sitter's universe*, *Journal of mathematics and physics*, **4**, número 3, maio de 1925 ou *Publications du Laboratoire d'Astronomie et Géodésie de l'Université de Louvain*, **2**, 37 (1925). Para a discussão da divisão de de Sitter, ver P. du Val, *Geometrical note on de Sitter's world*, **2**, *Phil. Magn.* (6) **47**, 930 (1924). O espaço é formado de hiperplanos normais a uma reta temporal descrita pelo centro introduzido, as trajetórias das nebulosas são ortogonais a estes planos, elas não são mais geralmente geodésicas e elas tendem a se tornar linhas de comprimento nulo assim que elas se aproximam do horizonte do centro, quer dizer, do hiperplano polar do eixo central em relação ao absoluto.

⁶Se nos limitarmos a duas dimensões, uma espacial e outra temporal, a divisão do espaço e tempo utilizada por de Sitter pode ser representada sobre uma esfera: as linhas espaciais são dadas pelos grandes círculos que se cruzam em um mesmo diâmetro e as linhas temporais são paralelas que cortam perpendicularmente as linhas espaciais. Uma destas paralelas é um grande círculo e, portanto, uma geodésica, correspondendo ao centro espacial, ao passo que o polo deste grande círculo é um ponto singular correspondendo ao horizonte do centro. Esta representação deve, é claro, ser estendida a quatro dimensões e a coordenada temporal deve ser suposta imaginária, mas a ausência de homogeneidade resultante da escolha do sistema de coordenadas subsiste. As coordenadas respeitando a homogeneidade implicam usar como linhas temporais um sistema de meridianos e por linhas espaciais as paralelas correspondentes, e o raio do espaço varia com o tempo.

Para encontrar uma solução que apresenta simultaneamente as vantagens da de Einstein e da de de Sitter, nós somos levados a estudar um universo de Einstein no qual o raio espacial varia de uma dada maneira.⁷

2 Universo de Einstein com raio variável. Equações de campo da gravitação. Conservação da energia.

Exatamente como feito na solução de Einstein nós consideramos o universo como um gás muito rarefeito do qual as nebulosas extra-galácticas formam as moléculas; suponhamos estas serem suficientemente numerosas para que um volume pequeno em relação às dimensões do universo contenha bastantes nebulosas para que possamos falar de densidade da matéria. Ignoramos a possível influência de condensações locais. Além disso, suponhamos que a repartição das nebulosas seja uniforme e então que a densidade seja independente da posição.

Para uma variação arbitrária do raio do universo a densidade, uniforme no espaço, varia no tempo. Além disso, a matéria é, em geral, submetida a umas tensões que, por causa da homogeneidade, se reduzem a uma simples pressão uniforme no espaço e variável no tempo. A pressão é igual a dois terços da energia cinética das moléculas, ela é negligenciável frente à energia condensada na matéria, o mesmo vale para as pressões internas das nebulosas ou das estrelas que estas contém; somos então levados a supor $p = 0$. Pode ser que seja necessário tomar em conta a pressão da radiação da energia irradiada circulante no espaço; esta energia é muito fraca, mas ela é repartida em todo o espaço e pode ser que forneça uma contribuição importante para a energia média. Manteremos o termo p nas equações gerais, interpretando-o como a pressão média de radiação da luz, mas imporemos $p = 0$ quando chegaremos à aplicação aos fenômenos astronômicos.

Indicamos com ρ a densidade de energia total, a densidade de energia irradiante será $3p$ e a densidade da energia concentrada na matéria é $\delta = \rho - 3p$.

⁷[N.d.T.] Isso já tinha sido feito pelo Friedmann em 1922.

É necessário identificar ρ e $-p$ com as componentes T_4^4 e $T_1^1 = T_2^2 = T_3^3$ do tensor da energia material e δ com T . Calculemos as componentes do tensor de Riemann contraído⁸ para um universo de intervalo:⁹

$$ds^2 = -R^2 d\sigma^2 + dt^2 \quad (2)$$

$d\sigma$ é o elemento de comprimento de um espaço de raio igual a um; o raio R do espaço é uma função do tempo. As equações de campo da gravitação se escrevem:

$$3\frac{R'^2}{R^2} + \frac{3}{R^2} = \lambda + \kappa\rho \quad (3)$$

e

$$2\frac{R''}{R} + \frac{R'^2}{R^2} + \frac{1}{R^2} = \lambda - \kappa p \quad (4)$$

As linhas indicam as derivadas com relação a t ; λ é a constante cosmológica cujo valor é desconhecido e κ é a constante de Einstein, igual a $1,87 \times 10^{-27}$, em unidades C.G.S. (8π em unidades naturais).

As quatro identidades que expressam a conservação do momento e da energia se reduzem aqui a:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{3R'}{R}(\rho + p) = 0 \quad (5)$$

que exprime a conservação da energia. Esta equação pode então substituir a (3). Ela é suscetível de uma interpretação interessante. Introduzindo o volume do espaço $V = \pi^2 R^3$, ela pode se escrever:

$$d(V\rho) + p dV = 0 \quad (6)$$

e ela exprime que a *variação da energia total mais o trabalho efetuado pela pressão de radiação é igual a zero*.

3 Situação em que a massa total do universo permanece constante.

Procuremos uma solução para que a massa total $M = V\delta$ permaneça constante. Poderemos então colocar

$$\kappa\delta = \frac{\alpha}{R^3} \quad (7)$$

⁸[N.d.T.] Este é o tensor di Ricci.

⁹[N.d.T.] O intervalo espaço-temporal, ou seja, a métrica.

onde α é uma constante.¹⁰ Tomando em conta a relação

$$\rho = \delta + 3p$$

que existe entre as diversas formas de energia, o princípio de conservação da energia se torna:

$$3d(pR^3) + 3pR^2 dR = 0 \quad (8)$$

cuja integração é imediata; chamando de β uma constante de integração, temos

$$\kappa p = \frac{\beta}{R^4} \quad (9)$$

e então

$$\kappa\rho = \frac{\alpha}{R^3} + \frac{3\beta}{R^4} \quad (10)$$

Substituindo na (2), temos que integrar

$$\frac{R'^2}{R^2} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\kappa\rho}{3} = \frac{\lambda}{3} - \frac{1}{R^2} + \frac{\alpha}{3R^3} + \frac{\beta}{R^4} \quad (11)$$

ou

$$t = \int \frac{dR}{\sqrt{\frac{\lambda R^2}{3} - 1 + \frac{\alpha}{3R} + \frac{\beta}{R^2}}} \quad (12)$$

Para α e β iguais a zero encontramos a solução de de Sitter¹¹

$$R = \sqrt{\frac{3}{\lambda}} \cosh \frac{\lambda}{3}(t - t_0) \quad (13)$$

A solução de Einstein obtém-se colocando $\beta = 0$ e R constante. Colocando $R' = R'' = 0$ na (2) e na (3) tem-se

$$\frac{1}{R^2} = \lambda \quad \frac{3}{R^2} = \lambda + \kappa\rho \quad \rho = \delta$$

então

$$R = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad \kappa\delta = \frac{2}{R^2} \quad (14)$$

e pela (6)

$$\alpha = \kappa\delta R^3 = \frac{2}{\sqrt{\lambda}} \quad (15)$$

¹⁰[N.d.T.] No trabalho do Lemaître tem-se α/R ao invés de α/R^3 , mas isso deve ser um erro de digitação. As fórmulas que seguem são condizentes com a equação (6). Note-se que, nas unidades $c = 1$ que estão sendo usadas, $\kappa\delta$ tem dimensões do inverso de um comprimento ao quadrado e então α tem dimensões de um comprimento.

¹¹Cfr. LANCZOS, l. c.

A solução de Einstein não resulta da relação (14) sozinha, além dessa é necessário que a condição inicial sobre R' seja nula. De fato, escrevendo

$$\lambda = \frac{1}{R_0^2} \quad (16)$$

para simplificar a notação e colocando na (11) $\beta = 0$ e $\alpha = 2R_0$, tem-se

$$t = R_0\sqrt{3} \int \frac{dR}{R - R_0} \sqrt{\frac{R}{R + 2R_0}} \quad (17)$$

Para esta solução as duas equações (13) não serão naturalmente mais verificadas.¹² Se escrevemos

$$\kappa\delta = \frac{2}{R_E^2} \quad (18)$$

teremos da (14) e da (15)

$$R^3 = R_E^2 R_0 \quad (19)$$

O valor de R_E , o raio do universo deduzido pela densidade média por meio da fórmula de Einstein (17), tem sido estimado por Hubble como sendo

$$R_E = 8,5 \times 10^{28} \text{ cm} = 2,7 \times 10^{10} \text{ parsecs} \quad (20)$$

Vamos ver que o valor de R_0 pode ser deduzido da velocidade radial das nebulosas; R poderá então ser calculado através da fórmula (18). Mostraremos em seguida que uma solução que introduza uma relação sensivelmente diferente da (14) conduzirá a consequências dificilmente admissíveis.

4 Efeito Doppler devido à variação do raio do universo.

A partir da fórmula (2) do intervalo do universo, a equação do raio luminoso é

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dt}{R} \quad (21)$$

onde σ_1 e σ_2 são os valores da coordenada caracterizando a posição espacial. Nós podemos falar do ponto σ_2 como a localização do observador e de σ_1 como a localização da fonte.

¹²[N.d.T.] Isso porque a solução de Einstein é instável. Podemos supor λ e δ serem na correta proporção como feito pelo Lemaître, mas se R não é nulo então haverá uma evolução.

Um raio de luz emitido um pouco mais tarde partirá de σ_1 no tempo $t_1 + \delta t_1$ e chegará em σ_2 no tempo $t_2 + \delta t_2$. Temos então,

$$\frac{\delta t_2}{R_2} - \frac{\delta t_1}{R_1} = 0, \quad \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (22)$$

onde R_1 e R_2 designam respectivamente os valores de R nos tempos δt_1 e δt_2 . t é o tempo próprio. Se δt_1 é o período da radiação emitida, δt_2 é o período da radiação recebida, δt_1 pode ser considerada como o período da luz emitida nas mesmas condições que na vizinhança do observador. Com efeito, o período da luz emitida em condições físicas similares deve ser o mesmo em todos os lugares quando ela é expressa em tempo próprio. A relação

$$\frac{v}{c} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1} - 1 = \frac{R_2}{R_1} - 1 \quad (23)$$

mede o efeito Doppler aparente devido à variação do raio do universo. *Ela é igual ao excesso em relação à unidade da relação dos raios do universo no instante em que a luz foi recebida e o instante em que ela foi emitida.* v é a velocidade do observador produzindo o mesmo efeito. Quando a fonte está suficientemente próxima, podemos escrever aproximadamente,

$$\frac{v}{c} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \frac{dR}{R} = \frac{R'}{R} dt = \frac{R'}{R} r, \quad (24)$$

onde r é a distância da fonte. Temos então,¹³

$$\frac{R'}{R} = \frac{v}{cr}. \quad (25)$$

As velocidades radiais de 43 nebulosas extragaláticas foram dadas por Strömberg.¹⁴

A grandeza aparente m dessas nebulosas se encontra no trabalho de Hubble. É possível deduzir suas distâncias, pois Hubble mostrou que as nebulosas extra-galáticas possuem magnitude absoluta aproximadamente iguais (magnitude $-15,2$ a 10 parsecs, os desvios individuais podendo atingir duas magnitudes para mais ou para menos),

¹³[N.d.T.] Os parágrafos que seguem a equação, até a próxima nota de rodapé, não foram traduzidos para o inglês no artigo de 1931 em MNRAS.

¹⁴*Analysis of radial velocities of globular clusters and non galactic nebula*, Ap. J. **353**, 353. Mt Wilson Contr. 292.

a distância r expressa em parsecs é então dada pela fórmula $\log r = 0, 2m + 4, 04$.

Encontra-se uma distância da ordem de 10^6 parsecs, variando de alguns décimos a 3,3 milhões de parsecs. O erro provável resultando da dispersão na magnitude absoluta é considerável. Para uma diferença de magnitude absoluta de duas magnitudes para mais ou para menos, a distância passa de 0,4 a 2,5 vezes a distância calculada. Além do mais, o erro que podemos cometer é proporcional à distância. Pode-se admitir que para uma distância de um milhão de parsecs, o erro resultante da dispersão em magnitude é da mesma ordem que o resultante na velocidade. Com efeito, uma diferença de brilho de uma magnitude corresponde a uma velocidade própria de 300 km, igual à velocidade própria do Sol em relação às nebulosas. Pode-se esperar de evitar um erro sistemático dando às observações um peso proporcional a $\frac{1}{\sqrt{1+r^2}}$ onde r é a distância em milhões de parsecs.

Utilizando as 42 nebulosas figurando nas listas de Hubble e de Strömberg,¹⁵ e levando em conta a velocidade própria do Sol (300 km na direção $\alpha = 315^\circ, \delta = 62^\circ$), encontra-se uma distância média de 0,95 milhões de parsecs e uma velocidade radial de 600 km/s, equivalente a 625 km/s a 10^6 parsecs.¹⁶

¹⁵Não se leva em conta a NGC 5194 que é associada à NGC 5195. A introdução das nuvens de Magalhães não tem influência nestes resultados.

¹⁶Não se dando peso às observações, encontraríamos 670 km/s a $1, 16 \times 10^6$ parsecs, 575 km/s a 10^6 parsecs. Alguns autores procuraram colocar em evidência a relação entre v e r e obtiveram apenas uma correlação muito fraca entre estas grandezas. O erro na determinação das distâncias individuais é da mesma ordem de grandeza que o intervalo que cobre as observações e a velocidade própria das nebulosas (em todas as direções) é grande (300 km/s, segundo Strömberg, parece então que estes resultados negativos não sejam nem favoráveis nem desfavoráveis à interpretação relativista do efeito Doppler. Tudo que a imprecisão das observações permite fazer é supor v proporcional a r e tentar evitar um erro sistemático na determinação da relação v/r . Cf. LUNDMARK, *The determination of the curvature of space-time in de Sitter world*, M.N. **84**, 747(1924), e Strömberg, l.c.

Nós adotamos então,¹⁷

$$\begin{aligned} \frac{R'}{R} &= \frac{v}{rc} = \frac{625 \times 10^5}{10^6 \times 3,08 \times 10^{18} \times 3 \times 10^{10}} \\ &= 0,68 \times 10^{-27} \text{cm}^{-1} \end{aligned} \quad (26)$$

Esta relação nos permite calcular R_0 . Temos, com efeito, usando (16),

$$\frac{R'}{R} = \frac{1}{R_0 \sqrt{3}} \sqrt{1 - 3y^2 + 2y^3} \quad (27)$$

onde definimos,

$$y = \frac{R_0}{R}. \quad (28)$$

Por outro lado, a partir de (18) e (26)

$$R_0^2 = R_E^2 y^3 \quad (29)$$

resultando em,

$$3 \left(\frac{R'}{R} \right)^2 R_E^2 = \frac{1 - 3y^2 + 2y^3}{y^3} \quad (30)$$

Introduzindo os valores numéricos de $\frac{R'}{R}$ (24) e de R_E (19), obtém-se:

$$y = 0,0465 \quad (31)$$

Tem-se então:

$$\begin{aligned} R &= R_E \sqrt{y} = 0,215 R_E = 1,83 \times 10^{28} \text{cm} \\ &= 6 \times 10^9 \text{parsecs} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} R_0 &= R y = R_E y^{\frac{3}{2}} \\ &= 8,5 \times 10^{26} \text{cm} = 2,7 \times 10^8 \text{parsecs} \\ &= 9 \times 10^8 \text{anos-luzes.} \end{aligned} \quad (33)$$

A integral (16) se calcula facilmente. Definindo

$$x^2 = \frac{R}{R + 2R_0} \quad (34)$$

ela se escreve

$$\begin{aligned} t &= R_0 \sqrt{3} \int \frac{4x^2 dx}{(1-x^2)(3x^2-1)} \\ &= R_0 \sqrt{3} \ln \frac{1+x}{1-x} + R_0 \ln \frac{\sqrt{3}x-1}{\sqrt{3}x+1} + C. \end{aligned} \quad (35)$$

¹⁷[N.d.T.] A partir deste paragrafo a tradução no artigo de 1931 volta a ser fiel.

Se nós designamos por σ a fração do raio do universo percorrida pela luz no tempo t , temos também usando (20),

$$\sigma = \int \frac{t}{R} = \sqrt{3} \int \frac{2dx}{3x^1 - 1 = \ln \frac{\sqrt{3x-1}}{\sqrt{3+1}}} + C. \quad (36)$$

Apresentamos embaixo uma tabela de σ e t em função de $\frac{R}{R_0}$.

$\frac{R}{R_0}$	$\frac{t}{R_0}$	σ (radianos)	σ (graus)	$\frac{v}{c}$
1	$-\infty$	$-\infty$	$-\infty$	19
2	-4,31	-0,889	-51°	9
3	-3,42	-0,521	-30°	5
4	-2,86	-0,359	-21°	4
5	-2,45	-0,266	-15°	3
10	-1,21	-0,087	-5°	1
15	-0,50	-0,029	$-1^\circ 7'$	$\frac{1}{3}$
20	0	0	0°	0
25	-0,39	-0,017	1°	
∞	∞	0,087	5°	

As constantes de integração são escolhidas de tal forma que σ e t são nulos para $\frac{R}{R_0} = 20$ em vez de 21,5. A última coluna fornece o efeito Doppler calculado pela fórmula (22). A partir da fórmula aproximada (23) $\frac{v}{r}$ seria proporcional a r e, conseqüentemente, a σ . O erro cometido adotando esta equação é de cinco milésimos para $\frac{v}{c} = 1$. Ela pode ser empregada na medida que o espectro permaneça visível.

5 Significado da relação (14)

Nós introduzimos a relação (1) entre as constantes α e λ a partir da solução de Einstein. Esta relação é a condição para que a expressão sob o radical do denominador da integral (11) admita uma raiz dupla R_0 dando por integração um termo logarítmico. Para raízes simples, obteríamos por integração uma raiz quadrada e o valor de R correspondente seria um mínimo como na solução (12) de de Sitter. Este mínimo ocorreria geralmente em uma época da ordem de R_0 , logo 10^9 de anos, quer dizer, a uma época recente da

escala da evolução estelar. Parece, então, que a relação existente entre as constantes α e λ deve ser próxima de (14) para a qual este mínimo é transferido a menos infinito.¹⁸

6 Conclusões

Obtivemos uma solução que verifica as seguintes condições:

1. A massa do universo é constante e está relacionada com a constante cosmológica pela relação de Einstein,

$$\sqrt{\lambda} = \frac{2\pi^2}{\kappa M} = \frac{1}{R_0}. \quad (37)$$

2. O raio do universo cresce continuamente a partir de um valor assintótico R_0 para $t = -\infty$.
3. O afastamento das nebulosas extragalácticas é um efeito cósmico devido à expansão do espaço e que permite calcular o raio R_0 pelas fórmulas (24) e (25) ou aproximativamente por $R_0 = \frac{rc}{v\sqrt{3}}$.

4. O raio do universo é da mesma ordem de grandeza que o raio R_E deduzido da densidade pela fórmula de Einstein. Temos

$$R = R_E \sqrt[3]{\frac{R_0}{R_E}} = \frac{1}{5} R_E \quad (38)$$

Esta dedução concilia as vantagens das soluções de de Sitter e de Einstein.

Observamos que a maior parte do universo está para sempre além de nosso alcance. O alcance do grande telescópio de Monte Wilson é estimado por Hubble a 5×10^7 parsecs, ou seja $\frac{R}{120}$, e o efeito Doppler correspondente é já de 3.000 km/s. Para uma distância de $0,087R$, ele é igual a um, e toda a luz visível é projetada no infravermelho. É impossível que se formem imagens fantasmagóricas das nebulosas ou dos sóis pois, mesmo se

¹⁸Se as raízes positivas se tornam imaginárias, o raio variaria a partir do zero sendo a variação diminuída na vizinhança do módulo das raízes imaginárias. Para uma relação sensivelmente diferente da (14), essa diminuição seria pequena e a duração da evolução a partir de $R = 0$ seria de novo da ordem de R_0 .

nenhuma absorção ocorra, estas imagens seriam deslocadas de muitas oitavas no infravermelho e não poderiam ser observadas.

É preciso conhecer a causa da expansão do universo. Nós vimos que a pressão de radiação realiza trabalho durante a expansão. Isto parece sugerir que esta expansão é produzida pela própria radiação. Em um universo estático a luz emitida

pela matéria percorre o espaço fechado, retorna ao seu ponto de partida e se acumula continuamente. Parece que aí deve ser buscada a origem da velocidade de expansão R'/R que Einstein supunha nula e que, na nossa interpretação, é observada como velocidade radial das nebulosas extra-galácticas.

DESI 2024: Um possível indício do fim da constante cosmológica?

por Hermano Velten¹ e Rodrigo von Marttens²

¹Universidade Federal de Ouro Preto

²Universidade Federal da Bahia

Um dos resultados mais intrigantes da cosmologia dos últimos anos foi publicado na plataforma arXiv¹ no mês de abril deste ano [1]. Trata-se do primeiro resultado cosmológico obtido pela colaboração DESI² (Dark Energy Spectroscopic Instrument) a partir da medida das impressões deixadas pelas oscilações acústicas de bárions na distribuição de galáxias e quasares. Utilizaremos a sigla BAO para nos referirmos a este observável cosmológico.³

Mas o que seria o BAO? A evolução do universo já foi descrita em diversos artigos publicados nos Cadernos de Astronomia. Para descrever a física do BAO, estamos interessados nos momentos que se antecederam à emissão da Radiação Cósmica de Fundo (CMB⁴), quando o universo tinha apenas 380.000 anos.⁵ Até este instante, o universo é composto por uma mistura de fótons, elétrons e prótons, na qual fótons e elétrons majoritariamente interagem via espalhamento Thompson: o chamado plasma primordial. As primeiras perturbações de densidade geradas na matéria bariônica são então fortemente suprimidas pela pressão de radiação deste plasma, causando, dessa maneira, uma espécie de oscilação na distribuição de densidade. Esta oscilação, por sua vez, acaba por viajar neste plasma como ondas sonoras se propagam em um meio material, de maneira análoga à propagação de ondas na superfície de um lago ao realizarmos uma pequena perturbação em sua superfície. Quando o espalhamento Thompson deixa de ser efetivo e os fótons ficam livres, formando a CMB, a matéria começa a se aglomerar e formar estruturas assim como descrito na Ref. [2]. Como resultado, quando observamos hoje uma região de maior densidade do universo, é possível observar em seu entorno um padrão de distribuição esférica de matéria resultante da onda que se propagou a partir de um ponto denso no universo primordial. Isto acaba por criar uma leve tendência de encontrar mais galáxias nesta casca esférica, de cerca de 500 milhões de anos luz de raio. Há, assim, um excesso de probabilidade de encontrar galáxias separadas por essa distância no universo. Tecnicamente, isto gera um pico na chamada função de correlação de dois pontos da distribuição de galáxias.⁶ Este fenômeno foi detectado pela primeira vez, em 2005, pelas colaborações Sloan Digital Sky Survey (SDSS) and Anglo-Australian Telescope Two-degree Field Galaxy Redshift Survey. Diversos projetos observacionais subsequentes também confirmaram este fenômeno [3, 4].

O que é o projeto DESI? Os chamados grandes *surveys* são peças fundamentais da pesquisa atual na área de Cosmologia/Astrofísica. No caso específico do DESI, ele consiste em uma grande colaboração envolvendo cerca de 450 pesquisadores de mais de 70 instituições científicas. Em um período de 5 anos de operação, serão medidos os espectros de cerca de 30 milhões de galáxias compreendendo um terço do céu noturno. Trata-se de

¹<https://arxiv.org/>.

²<https://www.desi.lbl.gov/>.

³Em inglês, Baryon Acoustic Oscillations (BAO)

⁴Em inglês, Cosmic Microwave Background.

⁵Recomendamos ao leitor a edição especial do Cadernos de Astronomia sobre o universo primordial, disponível em <https://periodicos.ufes.br/astronomia/issue/view/1562>.

⁶Recomendamos o vídeo publicado pela colaboração ARC Centre of Excellence for All-sky Astrophysics (CAASTRO) para a visualização deste fenômeno <https://www.youtube.com/watch?v=jpXuYc-wzk4&t=8s>.

um enorme volume de dados que perfazem os últimos 11 bilhões de anos da história do universo. Tudo isso é feito por meio de um novo sistema de captura de espectros montado no telescópio refletor Mayall, com espelho de 4 metros de abertura, no complexo do observatório nacional Kitt Peak, a 90 quilômetros da cidade de Tucson, no estado do Arizona, Estados Unidos. Este complexo conta com 22 telescópios, sendo o Mayall o maior deles. Apesar de o telescópio Mayall ter sido montado em 1973, este novo sistema de captura de espectros foi montado em 2019. Os resultados apresentados na Ref. [1] foram extraídos das observações ocorridas entre 14 de maio de 2021 e 14 de junho de 2022.

Quais são os novos resultados que a colaboração DESI apresenta na Ref. [1]? Para responder a esta pergunta, vamos relembrar a dinâmica do modelo Λ CDM, considerado o modelo padrão para descrever a evolução cosmológica recente. Neste modelo, a taxa de expansão do universo é descrita pela expressão

$$H = H_0 \sqrt{\frac{\Omega_{m0}}{a^3} + 1 - \Omega_{m0}}, \quad (1)$$

onde H_0 é a constante de Hubble, Ω_{m0} é a densidade fracionária da matéria (bárions + matéria escura) e a é o fator de escala do universo. Lembre-se que é usual normalizar o fator de escala, ou seja, seu valor hoje vale $a_0 = 1$. A contribuição da constante cosmológica se dá na combinação $\Omega_\Lambda = 1 - \Omega_{m0}$. A contribuição fracionária de cada componente i pode ser escrita como

$$\Omega_i(a) = \frac{\Omega_{i0}}{a^{3(1+w_i)}}. \quad (2)$$

Desta expressão, fica claro que se o parâmetro da equação de estado $w_i = p_i/\rho_i$, que mede a razão entre a pressão e densidade da componente i , for $w_i = -1$, temos uma contribuição constante para a densidade, isto é, uma densidade que não muda com o tempo independente da expansão do universo. Este caso representa justamente a equação de estado associada à constante cosmológica Λ ($w_\Lambda = -1$) para descrever a energia escura do universo e, conseqüentemente, sua atual fase de expansão acelerada. De fato, a constante cosmológica parece ser o candidato ideal para descrever a energia escura, uma vez que pode ser identificada com a energia do vácuo. No entanto, esta abordagem ainda possui lacunas tanto do ponto de vista teórico [5] quanto observacional [6].

Existem, no entanto, propostas que a energia escura poderia ser descrita por um fluido com uma equação de estado variável, isto é, dependente do tempo. A proposta mais utilizada para esta hipótese é utilizar a parametrização CPL (Chevallier-Polarsky-Linder) [7, 8], que ganhou destaque ao ser considerada pela Dark Energy Task Force (DETF) [9]. A parametrização CPL é dada pela seguinte expressão:

$$w_{de} = w_0 + w_a(1 - a). \quad (3)$$

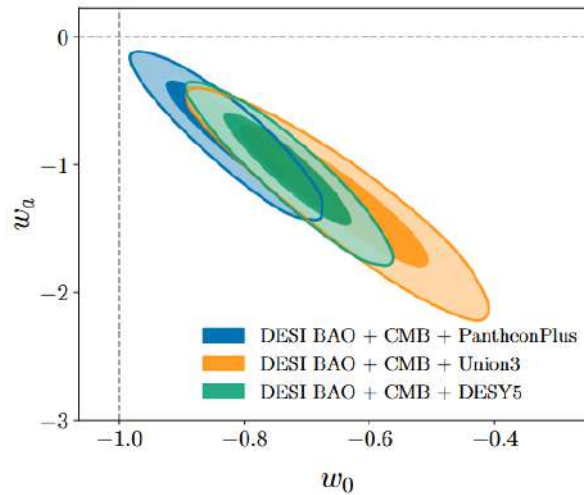
Note que a dependência temporal desta equação de estado está associada ao parâmetro w_a , que deve ser diferente de zero. Até este momento, todas as principais análises estatísticas para seleção de parâmetros cosmológicos, feitas com diferentes observáveis cosmológicos, indicavam consistência com $w_a = 0$ em pelo menos 2σ de nível de confiança [10]. Isto significa que nenhum resultado anterior proveniente de observações cosmológicas havia indicado, com uma probabilidade considerável, a possibilidade de que a equação de estado da energia escura pudesse variar com o tempo.

Por outro lado, os resultados apresentados na referência [1] indicam, pela primeira vez, uma preferência por $w_a \neq 0$ que pode atingir até 3.9σ de nível de confiança. Além da análise com BAO, a colaboração DESI também apresentou a análise combinando seus dados de BAO com dados de supernovas do tipo Ia e CMB. Para as supernovas do tipo Ia foram consideradas as três amostras de dados mais atuais disponíveis publicamente: PantheonPlus [11], Union 3 [12] e DES-SN5YR [13]. Já para a CMB, foi utilizado o último resultado do satélite Planck (2018), que consiste nos espectros de anisotropia da temperatura, polarização, correlação cruzada entre

Tabela 1: Resultado da análise de inferência de parâmetros cosmológicos apresentados pelo DESI. Adaptado da Tabela 3 da Ref. [1].

Resultados Cosmológicos DESI 2024		
Dados Observacionais	w_0	w_a
DESI + CMB + PantheonPlus	-0.827 ± 0.063	$-0.75^{+0.29}_{-0.25}$
DESI + CMB + Union 3	-0.65 ± 0.10	$-1.27^{+0.40}_{-0.34}$
DESI + CMB + DES-SN5Y5	-0.727 ± 0.067	$-1.05^{+0.31}_{-0.27}$

temperatura e polarização e lenteamento fraco da CMB [10].⁷ De maneira geral, considerando diferentes combinações entre os conjuntos de dados mencionados, os resultados reportados pela colaboração DESI é consistente com $w_0 < -1$ e $w_a < 0$. Em detalhe, os resultados das análises combinadas obtidos pela colaboração DESI para os parâmetros w_0 e w_a são mostrados na Tabela 1. As curvas de contorno com níveis de 1σ e 2σ para o plano $w_0 \times w_a$ obtidos dessas mesmas análises são mostradas na Figura 1. Nesta figura, o caso em que a energia escura não varia com o tempo é representado pela linha tracejada horizontal ($w_a = 0$) que, como pode ser visto, está totalmente fora da região preferida pelos dados. Em particular, o modelo Λ CDM é representado pelo no encontro da linha tracejada horizontal com a linha tracejada vertical ($w_a = 0$ e $w_0 = -1$), que também está excluído da região preferida pelos dados.

**Figura 1:** Contornos de 68% e 95% de confiança estatística no plano $w_0 \times w_a$ para diferentes combinações de dados cosmológicos. Cada cor representa a combinação dos dados de DESI BAO e radiação cósmica de fundo (CMB), somados a uma amostra de Supernovas tipo Ia. Figura retirada da Ref. [1].

Reforçamos que ainda é cedo para concluir definitivamente que a energia escura é, de fato, uma componente com variação temporal e, portanto, que a famosa constante cosmológica Λ estaria descartada. No entanto, é natural que estes resultados despertem o interesse da comunidade acadêmica neste tópico. Dessa forma, tão logo os resultados do DESI se tornaram públicos, em abril de 2024, vários grupos de pesquisa se debruçaram sobre estes dados e várias discussões interessantes surgiram na literatura nos últimos 4 meses. Em particular, destacamos resultados de análises com diferentes modelos cosmológicos, que parecem confirmar que os resultados obtidos pelo DESI não são dependentes da parametrização escolhida para a energia escura [16], e os debates acerca dos seguintes tópicos:

⁷Vale ressaltar que para o lenteamento fraco da CMB foi utilizada a *pipeline* mais atual *NPIPE PR4 Planck CMB lensing reconstruction* [14] combinada com o Data Release 6 do Atacama Cosmology Telescope (ACT) [15].

- o papel dos dados de galáxias luminosas vermelhas (LRG⁸) para o resultado final do DESI⁹ [17];
- dependência dos resultados do DESI com a escolha dos *priors* estatísticos [18];
- possibilidade de sistemáticos nos dados de supernovas do tipo Ia [19];

Vale ressaltar que este é apenas o resultado do primeiro *data release* do DESI, contendo apenas dados de BAO. É esperado que o DESI divulgue em breve a análise desenvolvida com a totalidade do espectro de potência da matéria (*full shape*) para o primeiro *data release*. Esta análise e as próximas análises lançadas com dados futuros serão cruciais para a confirmação deste primeiro resultado.

Referências

- [1] A. G. Adame et al., *DESI 2024 VI: Cosmological Constraints from the Measurements of Baryon Acoustic Oscillations* (2024). [ArXiv:2404.03002](#).
- [2] H. Velten, *Matéria escura, energia escura e a busca por uma nova teoria para a gravitação*, *Cadernos de Astronomia* **1**(1), 40 (2020).
- [3] I. J. Lewis et al., *The Anglo-Australian Observatory 2dF facility*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **333**(2), 279 (2002). [ArXiv:astro-ph/0202175](#).
- [4] D. G. York et al., *The Sloan Digital Sky Survey: Technical Summary*, *Astronomical Journal* **120**, 1579 (2000). [ArXiv:astro-ph/0006396](#).
- [5] S. Weinberg, *The Cosmological constant problems*, in *4th International Symposium on Sources and Detection of Dark Matter in the Universe (DM 2000)* (2000), 18–26. [ArXiv:astro-ph/0005265](#).
- [6] A. G. Riess, *The expansion of the Universe is faster than expected*, *Nature Reviews Physics* **2**(1), 10 (2019). [ArXiv:2001.03624](#).
- [7] M. Chevallier e D. Polarski, *Accelerating universes with scaling dark matter*, *International Journal of Modern Physics D* **10**(02), 213 (2001). [ArXiv:gr-qc/0009008](#).
- [8] E. V. Linder, *Exploring the expansion history of the universe*, *Physical Review Letters* **90**(9), 091301 (2003). [ArXiv:astro-ph/0208512](#).
- [9] A. Albrecht et al., *Report of the Dark Energy Task Force* (2006). [ArXiv:astro-ph/0609591](#).
- [10] N. Aghanim et al., *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, *Astronomy & Astrophysics* **641**, A6 (2020), Erratum: *Astron. Astrophys.* 652, C4 (2021). [ArXiv:1807.06209](#).
- [11] D. Brout et al., *The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints*, *The Astrophysical Journal* **938**(2), 110 (2022). [ArXiv:2202.04077](#).
- [12] D. Rubin et al., *Union Through UNITY: Cosmology with 2,000 SNe Using a Unified Bayesian Framework* (2023). [ArXiv:2311.12098](#).
- [13] B. O. Sánchez et al., *The Dark Energy Survey Supernova Program: Light curves and 5-Year data release* (2024). [ArXiv:2406.05046](#).
- [14] J. Carron, M. Mirmelstein e A. Lewis, *CMB lensing from Planck PR4 maps*, *JCAP* **09**, 039 (2022). [ArXiv:2206.07773](#).

⁸Em inglês, Luminous Red Galaxies.

⁹Conforme pode ser visto na Figura 1 da Ref. [1], os dados que apresentam maior desvio com relação à previsão do modelo Λ CDM são os dados provenientes das LRGs, enquanto os outros dados apresentam boa concordância.

-
- [15] M. S. Madhavacheril et al., *The Atacama Cosmology Telescope: DR6 Gravitational Lensing Map and Cosmological Parameters*, *The Astrophysical Journal* **962**(2), 113 (2024). [ArXiv:2304.05203](#).
- [16] W. Giarè et al., *Robust Preference for Dynamical Dark Energy in DESI BAO and SN Measurements* (2024). [ArXiv:2407.16689](#).
- [17] Z. Wang et al., *The role of LRG1 and LRG2's monopole in inferring the DESI 2024 BAO cosmology* (2024). [ArXiv:2405.02168](#).
- [18] V. Patel e L. Amendola, *Comments on the prior dependence of the DESI results* (2024). [ArXiv:2407.06586](#).
- [19] G. Efstathiou, *Evolving Dark Energy or Supernovae Systematics?* (2024). [ArXiv:2408.07175](#).