

CADERNOS DE ASTRONOMIA

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

Astrobiologia



GalileoMobile:
inspirando jovens
sob o mesmo céu

A origem dos
elementos

Geofísica:
Investigando o
inacessível

O Telescópio
James Webb e a
Missão Gaia

CADERNOS DE ASTRONOMIA

ISSN 2675-4754

EDITORES RESPONSÁVEIS

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

Felipe Tovar Falciano (CBPF)
ftovar@cbpf.br

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

Júlio C. Fabris (UFES)
julio.fabris@cosmo-ufes.org

Júnior Diniz Toniato (UFES)
junior.toniato@ufes.br

CONSELHO CIENTÍFICO

Adriano Mesquita Oliveira (UFES)

Davi Rodrigues (UFES)

Jose Alexandre Nogueira (UFES)

José A. Freitas Pacheco (OCA, França)

Alan M. Velasquez Toribio (UFES)

Hermano Velten (UFOP)

Júlio C. Fabris (UFES)

Júnior Diniz Toniato (UFES)

Martín Richarte (UFES)

Oliver F. Piattella (UFES)

Renato Las Casas (UFMG)

Sergio Mascarello Bisch (UFES)

Valerio Marra (UFES)

William Ricaldi (UFES)

Winfried Zimdahl (UFES/UD, Alemanha)

RESPONSÁVEL GRÁFICO

Felipe Tovar Falciano - ftovar@cbpf.br

ENDEREÇO

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

SOBRE A REVISTA

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

SUBMISSÕES

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

NÚCLEO COSMO-UFES

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

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

PPGCOSMO

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

Maiores informações:

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

Crédito imagens:

Capa: NASA, ESA, CSA, and STScI

Contra-capas: NASA / ESA / G. Illingworth and D. Magee

(University of California, Santa Cruz), K. Whitaker (University of Connecticut), R. Bouwens (Leiden University), P. Oesch (University of Geneva), and the Hubble Legacy Field team

Sumário

Carta ao Leitor

Os Editores 1

Seção Temática - Astrobiologia

Apresentação

Júlio C. Fabris, José A. F. Pacheco, Hermano Velten 2

A procura por exoplanetas habitáveis

Beatriz B. Siffert 4

Os limites para a vida na biosfera terrestre

Jorge E. Horvath 16

Habitabilidade em luas de sistemas planetários: uma nova fronteira

Eduardo Janot Pacheco, Vitória Bellecerie da Fonseca 21

Procura de vida extraterrestre: habitabilidade do sistema planetário

Gliese 667C

J. A. de Freitas Pacheco 35

Impacto da atividade das estrelas na habitabilidade de exoplanetas

Adriana Valio 49

Um critério energético para o desenvolvimento de vida em um exoplaneta

Hermano Velten, Douglas Delladea, Arthur Primola 59

AstroBioQuímica em ambientes inóspitos: estudo de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em galáxias ativas

Dinalva A. Sales, Carla M. Canelo 66

Divulgação Científica, Ciência e Sociedade

GalileoMobile: inspirando jovens sob o mesmo céu

Diego Torres Machado 75

Geofísica – Investigando o inacessível

Marcia Ernesto, George Caminha-Maciel 83

A origem dos elementos da Tabela Periódica

Jorge E. Horvath 92

Missão Espacial Gaia

Ramachrisna Teixeira 101

O Telescópio Espacial James Webb - uma nova era na Astronomia

Jaziel G. Coelho 112

Perturbações seculares nas órbitas de Júpiter e Saturno

Luiz Pedro Orosz 122

Artigos

Um Primeiro passo em direção à modificação da gravidade: Teorias Escalar-Tensoriais e $f(R)$

Pedro Bessa, Túlio Ottoni 126

Textos Clássicos

Einstein e sua famosa fórmula $E = mc^2$

Oliver F. Piattella 144

Notas

A atualidade de Giordano Bruno

Mario Novello 149

Carta ao leitor

As grandes navegações nos séculos XV e XVI estimularam a imaginação dos homens naqueles séculos distantes. Que mundo novos, novas culturas, novos tipos de seres humanos, de animais, plantas, estariam para ser encontrados? Estas expectativas se refletiram na pintura, na literatura, na filosofia deixando para nós alguns testemunhos de como a descobertas de novas terras e mares excitou os homens e seu imaginário. À medida que a astronomia evoluiu nos séculos posteriores, nos demos conta que o nosso planeta, a Terra, não é o centro do universo, que o Sol é uma estrela como tantas outras, muitas visíveis a olho nu mas outras apenas acessíveis através de telescópios. Estas descobertas criaram uma outra vaga no imaginário humano, sobre novos possíveis mundos, sobre novos possíveis seres habitando o Cosmo. Um exemplo bem conhecido de como isto se refletiu em nós foram os livros de Júlio Verne e o começo daquilo que denominamos hoje *ficção científica*.

Mas, desde algumas décadas, mais precisamente desde a última década do século passado, muitas especulações saíram do domínio da ficção para se tornar ciência no sentido mais estrito do termo: os primeiros planetas orbitando estrelas que não o Sol foram descobertos. Esta é uma proeza tanto técnica quanto científica, primeiro devido às dificuldades em identificar planetas distando dezenas, centenas de trilhões de quilômetros de nós, segundo pelos novos tipos de estudos suscitados. Em particular, surge um novo ramo da ciência, a astrobiologia, que procura identificar as condições para a emergência da vida no Cosmo e como ela se propaga no espaço.

A sessão temática desta edição dos Cadernos de Astronomia enfoca o estado de arte da astrobiologia. Pesquisadores trabalhando nesta área do conhecimento científico discutem a descoberta de exoplanetas, as condições para um planeta abrigar vida, o surgimento de moléculas complexas e sua difusão pelo espaço, a possibilidade de planetas do Sistema Solar abrigar seres vivos, entre outros assuntos correlatos. Procuramos assim fornecer um painel amplo da astrobiologia e que se destina não apenas aos curiosos sobre o assunto, mas também àqueles que pretendem se dedicar a esses estudos fascinantes.

Outros artigos do presente número focam em temas de grande importância e atualidade científica. Os telescópios James Webb e Gaia, que prometem revolucionar, não apenas os estudos em astrobiologia mas o da astronomia como um todo, são discutidos em detalhes. As características geológicas da nossa morada, a Terra, são extensamente descritas. A origem dos elementos químicos é abordada também em detalhes. Rememora-se Giordano Bruno, um dos precursores da moderna concepção do cosmo. Um dos artigos seminais da teoria da relatividade restrita recebe, pela primeira vez, tradução para o português. Esperamos assim contribuir para a compreensão do excitante momento da história da ciência que vivemos atualmente.

Os editores

Astrobiologia

A existência de vida em outros planetas excitou a imaginação dos homens desde a Antiguidade. Há aproximadamente 400 anos, através dos trabalhos sobretudo de Kepler e Galileu, percebeu-se que os planetas conhecidos eram semelhantes em muitos aspectos à nossa morada, a Terra, e que orbitavam em torno do Sol, formando o que se chama hoje de Sistema Solar. Esses planetas abrigariam vida como ocorre com a Terra? Outras estrelas poderiam formar sistemas planetários como o nosso? Se sim, uma pergunta decorrente seria a possibilidade das condições verificadas na Terra pudessem ser reproduzidas nesses outros sistemas planetários. Ao mesmo tempo, o conhecimento das condições para a emergência da vida progrediram substancialmente nestas últimas décadas, e percebeu-se que é preciso reunir uma série de fatores para que a vida, como nós conhecemos, ocorra. Os trabalhos de pesquisadores como Oparin, entre outros, na primeira metade do século XX, procuraram identificar como é possível que moléculas orgânicas complexas possam se formar nas condições presumidas da Terra primitiva. O desenvolvimento de novas técnicas de observação astronômica, inclusive com o surgimento de telescópios espaciais, levaram a um impressionante avanço nesses estudos. O recém lançado telescópio espacial James Webb, um dos grandes expoentes da astronomia das próximas décadas, tem como um de seus alvos científicos a busca por características químicas e físicas das atmosferas de exoplanetas. Um de seus primeiros resultados foi a detecção de água e nuvens no planeta WASP-96 b.

O primeiro exoplaneta, orbitando em torno da estrela 51 Pegasi foi detectado em 1995 pelos astrônomos suíços Michel Mayor e Didier Queloz, ambos agraciados com o Prêmio Nobel de física em 2019. Hoje, graças a diferentes técnicas de detecção, conhecemos mais de 5000 exoplanetas e o número aumenta continuamente. As características destes exoplanetas são estudadas cada vez com maiores detalhes e a importância do tipo de estrela central tem sido realçada, trazendo ao debate elementos técnicos a respeito da astrofísica estelar. A estabilidade dos sistemas planetários revelou a importância de planetas gigantes como Júpiter. O conceito (discutível) de *zona de habitabilidade*, define um intervalo de distâncias da estrela central na qual planetas no seu interior poderiam manter água no estado líquido na sua superfície e, portanto, abrigar formas de vida. A noção de zona de habitabilidade tem sido cada vez mais debatida na literatura pois vários autores preferem o conceito de *planeta habitável*.

As observações indicam que moléculas orgânicas complexas podem ser sintetizadas em nuvens moleculares nas quais se formam as estrelas e os planetas. Tais moléculas podem ser transportadas através do espaço por meteoros e cometas, reforçando a ideia que possam ter contribuído de forma significativa para a emergência da vida na Terra. Todos estes estudos contribuíram para o surgimento de um campo multidisciplinar, a astrobiologia, cujo objetivo maior é a procura de vida extraterrestre.

Os Cadernos de Astronomia trazem neste número uma série de artigos que traçam um painel

dos diferentes aspectos contribuindo hoje para o desenvolvimento da astrobiologia. Os artigos que se seguem relatam o conhecimento atual sobre exoplanetas, sobre a sintetização de moléculas orgânicas no espaço, a forma como elas se difundem através do cosmos, a possibilidade de vida não apenas em outros planetas do Sistema Solar como também nos satélites destes planetas, em particular os satélites dos planetas gigantes. Todas estas investigações conduzem à necessidade de compreender como seres vivos primitivos, denominados *extremófilos*, podem sobreviver em condições extremas de temperatura, pressão, acidez ou salinidade e mesmo na ausência de luz.

Os artigos foram redigidos por pesquisadores trabalhando em disciplinas relacionadas com a astrobiologia. Observamos que este é um campo do conhecimento em franca expansão, e o objetivo desta seção temática é apresentar o estado atual desta excitante nova fronteira do conhecimento científico.

Júlio C. Fabris, José A. F. Pacheco e Hermano Velten

A procura por exoplanetas habitáveis

Beatriz B. Siffert

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

Desde a descoberta dos primeiros planetas fora do Sistema Solar, os chamados exoplanetas, na década de 90, mais de 5000 exoplanetas já foram descobertos, além dos milhares de candidatos sendo analisados. A descoberta de que existem sistemas planetários ao redor de outras estrelas, suscita naturalmente o questionamento sobre a possibilidade de que esses exoplanetas possam hospedar vida. É nesse contexto que ganha cada vez mais destaque a astrobiologia, área de pesquisa multidisciplinar que consiste no estudo da origem e evolução da vida no Universo. Neste artigo apresentaremos uma breve revisão sobre a procura por exoplanetas e os principais resultados interessantes do ponto de vista da astrobiologia até o momento. Iniciaremos pela definição do conceito de zona habitável estelar, região em torno de uma estrela na qual é, em princípio, possível manter água no estado líquido na superfície de um planeta rochoso. Comentaremos sobre a procura por vida no Sistema Solar, descreveremos os principais métodos de detecção de exoplanetas e apresentaremos exemplos de exoplanetas com particular interesse astrobiológico. Finalizaremos comentando sobre a procura pelas chamadas *bioassinaturas* e *tecnassinaturas*, indicadores da existência de vida fora da Terra, e as missões presentes e futuras com maior potencial para novas descobertas na área da astrobiologia.

Abstract

Since the discovery of the first planets outside the Solar System, the so-called exoplanets, in 1992, more than 5000 exoplanets have been found and there are thousands of other candidates currently under study. Once we discovered the existence of other planetary systems, it becomes natural to ask ourselves if they could also host life. In this context, the multidisciplinary science of astrobiology, which studies the origin and evolution of life in the Universe, gains increasingly visibility. In this paper we present a brief review on the search for exoplanets and the main results so far regarding their astrobiological interest. Starting with the definition of stellar habitable zone, which is the region around a star where it is, in principle, possible to hold liquid water on the surface of a rocky planet, we will then comment on the search for life in the Solar System and describe the main methods currently used to find new exoplanets. We will also present some examples of known exoplanets that are particularly interesting from an astrobiological point of view. We will end by commenting on the search for the so-called *biosignatures* and *technosignatures*, which are expected to indicate the existence of life outside Earth, and current and future missions with greatest potential for new discoveries in this field.

Palavras-chave: astrobiologia, exoplaneta, zona habitável, trânsito primário, velocidade radial.

Keywords: astrobiology, exoplanet, habitable zone, primary transit, radial velocity.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38610](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38610)

1 Introdução

A astrobiologia é uma área de pesquisa multidisciplinar cujo objetivo é o estudo da origem e evolução da vida no Universo. Abrangendo tópicos como a procura pelas primeiras formas de vida na Terra, o estudo dos micro-organismos extremófilos, capazes de sobreviver em condições extremas, e a exploração espacial, foi somente nas últimas décadas que a astrobiologia começou a ganhar maior credibilidade, principalmente devido à descoberta de planetas fora do Sistema Solar, os chamados “exoplanetas”.

Atualmente, existem mais 5000 planetas exoplanetas confirmados, distribuídos em mais de 3700 sistemas planetários. Foi no início da década de 90 que ocorreu a descoberta dos primeiros exoplanetas, que orbitavam o pulsar PSR 1257+12 [1]. Essa foi uma descoberta bastante inusitada visto que pulsares são estrelas em fase de evolução avançada e que já passaram por uma explosão de supernova, o que acreditava-se deveria ter destruído eventuais planetas ao seu redor. Em 1995, foi descoberto o primeiro exoplaneta orbitando uma estrela como o Sol, 51 Pegasi [2],

o que rendeu aos pesquisadores o Prêmio Nobel de Física em 2019. Desde então, a taxa de descobertas de exoplanetas vem crescendo com o aperfeiçoamento da instrumentação e das técnicas de detecção e, recentemente, foi anunciada a descoberta do primeiro candidato a exoplaneta fora da Via Láctea [3].

Mais de 90% dos exoplanetas conhecidos foram descobertos pelas técnicas de detecção chamadas de “velocidade radial” e “trânsito primário”. Enquanto a primeira consiste na detecção de pequenas variações nas velocidades das estrelas durante a órbita de seu(s) planeta(s), a segunda consiste na observação da diminuição do brilho da estrela durante a passagem de um planeta na frente dela. A técnica do trânsito planetário primário, a mais bem sucedida até o momento, foi utilizada no passado pelas missões espaciais Kepler [4] e K2 [5], da agência espacial americana, NASA, e CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires) [6], da agência espacial francesa, CNES, que contou com participação brasileira. Esse também é o método de detecção atualmente utilizado pela missão TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite) [7], lançada em 2018, também da NASA. Outras técnicas para a detecção de exoplanetas, como por exemplo o imageamento direto e o microlenteamento gravitacional, embora tenham produzido ainda poucos resultados, permanecem promissoras.

A aplicação de todas essas técnicas por mais de 50 telescópios espaciais e de superfície permitiu a identificação de exoplanetas muito diferentes daqueles que conhecemos no Sistema Solar, em uma faixa muito maior de tamanhos, massas e características orbitais, em torno de diferentes tipos de estrelas. De acordo com a base de dados “The Extrasolar Planets Encyclopedia”¹ [8], estes exoplanetas têm raios variando entre $0,3 R_{\oplus}$ até $\sim 6,5$ vezes o raios de Júpiter, e massas de $0,02 M_{\oplus}$ até 67 vezes a massa de Júpiter. São encontrados a diferentes distâncias de suas estrelas hospedeiras, desde 0.0026 UA ² até mais de 6000 UA .

Destes exoplanetas, algumas dezenas são considerados potencialmente habitáveis por apresentarem características similares às da Terra, nosso único exemplo de planeta habitado até o mo-

mento.

Neste artigo, apresentaremos uma breve revisão sobre habitabilidade e métodos de detecção de exoplanetas, do ponto de vista de físicos e astrônomos. Na seção 2, discutiremos o conceito de zona habitável estelar e comentaremos sobre a habitabilidade no Sistema Solar. Na seção 3, descreveremos os métodos utilizados para a descoberta de exoplanetas e na seção 4 apresentaremos alguns dos exoplanetas descobertos até o momento com maior potencial astrobiológico. Por fim, comentaremos na seção 5 sobre a procura por bioassinaturas e tecnoassinaturas, e as principais perspectivas de programas futuros para a descoberta de novos exoplanetas e a caracterização de exoplanetas conhecidos.

2 O conceito de habitabilidade

Até o presente momento, a vida na Terra é o único exemplo que conhecemos e, portanto, é natural que nossa procura por vida em outras partes do Universo a tome como ponto de partida. De fato, o atual conceito de habitabilidade planetária se baseia no fato de que a vida, nos moldes em que a conhecemos, está intimamente relacionada à existência de água no estado líquido. A água líquida funciona como um solvente para a troca e o transporte de substâncias no interior dos seres vivos e entre eles e o ambiente externo. A molécula de água é composta por elementos extremamente abundantes o Universo, visto que o hidrogênio corresponde a mais de 70% da matéria comum conhecida (excluindo a matéria escura, de natureza ainda desconhecida), e o oxigênio é o terceiro elemento mais abundante no Universo. Assim, é provável que a água seja uma molécula presente em muitos outros planetas e, pelo menos nesse aspecto, basear as nossas procuras por vida na existência da água não parece limitar significativamente nossas chances de encontrá-la.

2.1 Zonas habitáveis estelares

As limitações observacionais fazem com que não tenhamos ainda acesso aos detalhes dos planetas em outros sistemas planetários. Assim, até o momento, a busca por condições favoráveis à vida fora do Sistema Solar se baseia predominantemente no conceito de zona habitável (ZH) estelar, cuja definição clássica é a da região em torno

¹www.exoplanet.eu

²A unidade astronômica (UA) equivale à distância média entre a Terra e o Sol, com $1 \text{ UA} = 149597870700 \text{ m}$.

de um estrela na qual um corpo rochoso como a Terra pode sustentar água no estado líquido em sua superfície. A restrição dessa definição para corpos rochosos como a Terra se explica pelo fato de que é necessário que exista uma superfície sólida sobre a qual grande quantidade de água líquida possa se manter por tempo o suficiente para que seja possível o desenvolvimento de vida.

A delimitação dos limites da zona habitável é feita de forma que os corpos não estejam nem próximos demais e nem distantes demais da estrela de forma a serem quentes ou frios demais para sustentar água no estado líquido em sua superfície.

Notem que, a definição de zona habitável é apenas um ponto de partida para nos guiar na procura por vida fora da Terra. Por um lado, estar dentro da ZH não garante que o planeta possua água e, mesmo que possua, pode não ter vida. Por outro lado, estar fora da zona habitável também não é sinônimo de não ter água no estado líquido. De fato, ao limitarmos a definição de ZH à existência de água líquida na superfície de um corpo rochoso, não estamos considerando a possibilidade da existência de água líquida subterrânea ou sob uma camada de gelo, como acreditamos existir em luas do Sistema Solar, por exemplo, que se encontram em regiões consideradas frias demais de acordo com a definição clássica da ZH. Portanto, corpos celestes mais distantes da estrela podem ainda ser habitáveis, no sentido de que possuem água líquida, mesmo não estando dentro da definição clássica de zona habitável.

Além disso, se considerarmos apenas o calor fornecido pela estrela para delimitar a ZH, estaremos negligenciando características planetárias que podem influenciar na sua habitabilidade. As características da órbita do planeta em torno da estrela, por exemplo, podem fazer com que ele se torne inabitável mesmo estando dentro da ZH. Em sistemas planetários compactos como aqueles de estrelas anãs M³, por exemplo, os planetas podem estar em rotação síncrona com suas estrelas, de forma que uma de suas faces esteja sempre recebendo radiação estelar enquanto a outra permanece sempre escura. Essa sincronização ocorre progressivamente devido aos chamados efeitos de maré, que atuam como uma espécie de “atrito”

gravitacional entre corpos em órbita mútua e se torna mais relevantes para órbitas muito próximas. É o mesmo efeito que fez com que a Lua esteja sempre com a mesma face voltada para a Terra. No caso da rotação síncrona ocorrer entre um planeta e a sua estrela, a face do planeta sempre voltada para a estrela terá temperaturas permanentemente mais altas do que a face escura, situação que pode afetar de forma negativa as condições de habitabilidade. A temperatura de um planeta ou lua pode também ser afetada pelos próprios efeitos de maré (entre o planeta e a estrela e/ou entre o planeta e a lua), por fontes internas de calor, pela presença de uma atmosfera, pela atividade tectônica, dentre outros. Nenhuma dessas características dos exoplanetas é, no entanto, ainda acessível.

Em [9] e nos trabalhos subsequentes [10] e [11], são apresentados métodos para o cálculo dos limites da ZH levando em consideração uma atmosfera planetária hipotética composta por nitrogênio molecular (N₂), dióxido de carbono (CO₂) e água (H₂O) e cujas características variam apenas com a altitude. Esses trabalhos levam em consideração o fato de que a presença de algumas moléculas como CO₂ e H₂O na atmosfera de um planeta impede que o calor recebido da estrela seja totalmente reemitido de volta para o espaço. Esse processo, que nada mais é do que o efeito estufa que vem se acentuando na atmosfera terrestre, faz com que a temperatura do planeta se torne maior do que a temperatura de um planeta com as mesmas características, mas sem atmosfera. Os autores propõem duas possíveis definições para a ZH de uma estrela: uma conservadora e uma otimista.

A distância da borda interna da ZH conservadora é a aquela para a qual se inicia o chamado “efeito estufa descontrolado” (*runaway greenhouse*), que ocorre quando toda a água na superfície de um planeta rochoso é vaporizada e a atmosfera se torna opaca para radiação térmica. Nessa situação, a perda de água líquida da superfície é irreversível, visto que a presença de vapor de água na atmosfera aumentará o efeito estufa e o planeta se tornará ainda mais quente, impedindo que a água volte a se condensar. A borda externa da ZH conservadora se localiza na distância máxima da estrela tal que a temperatura de 273 K seja mantida com uma atmosfera de CO₂. De fato, mesmo que um planeta esteja a uma dis-

³As anãs M são as menores e mais frias estrelas da sequência principal, com luminosidade de até ~ 7% o valor da luminosidade do Sol.

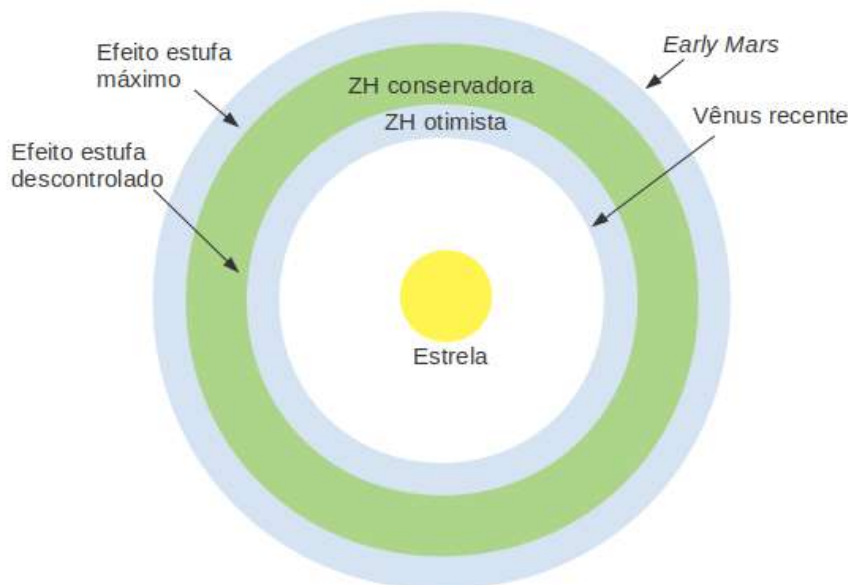


Figura 1: Representação das zonas habitáveis conservadora (em verde) e otimista (em azul) ao redor de uma estrela. Os limites que definem as bordas da ZH conservadora estão indicados na parte esquerda da figura e aqueles que definem as bordas da ZN otimista estão indicados na parte direita.

tância da estrela tal que a água congelaria na sua superfície de um planeta semelhante, mas sem atmosfera, o efeito estufa provocado pela presença de CO_2 na atmosfera será responsável por manter a temperatura do planeta acima de 273 K, que é a temperatura de fusão da água. No entanto, se a distância da estrela é grande o suficiente, o próprio dióxido de carbono irá se condensar na atmosfera, produzindo nuvens que, por terem alta refletividade, fazem com que grande parte da radiação térmica da estrela seja refletida de volta para o espaço. A partir desse ponto, conhecido como ponto de ‘efeito estufa máximo’ (*maximum greenhouse*), o planeta se tornará ainda mais frio. Ou seja, ao passo em que a borda interna da ZH é definida como a distância mínima da estrela para a qual o aquecimento devido ao efeito estufa ainda permite temperaturas abaixo de 373 K, a borda externa ocorre a uma distância máxima da estrela para a qual a temperatura do planeta pode ser mantida acima de 273 K devido ao efeito estufa.

Os autores obtêm também limites menos conservadores para a ZH baseados em evidências geológicas de que Vênus não teve água líquida em sua superfície ao menos nos últimos 1 bilhão de anos (que dá origem ao limite para borda interna conhecido como “Vênus recente”) e de que Marte teve água líquida em sua superfície 3.8 bilhões de anos atrás (que dá origem ao limite para a borda externa conhecido como “Marte antigo”). Na fi-

gura 1, essa ZH, conhecida como ZH otimista, está representada em azul, enquanto que a ZH conservadora está representada em verde.

É importante notar que, como as estrelas evoluem com o tempo, seu brilho muda e, como consequência também os limites de suas zonas habitáveis.

2.2 Habitabilidade no Sistema Solar

De acordo com as definições da seção anterior, a ZH conservadora atual do Sistema Solar compreende as órbitas da Terra e de Marte [11]. Mesmo levando em conta a ZH otimista, Mercúrio e Vênus estão sempre próximos demais da estrela, aquém da borda interna da ZH, e os planetas gigantes estão sempre em regiões do Sistema Solar frias demais, além da borda externa. Daqui a bilhões de anos, o Sol se transformará em um tipo de estrela maior, conhecida como gigante vermelha, o que fará com que a sua ZH se afaste dele. Se a posição dos planetas se mantiver como é atualmente, Terra e Marte sairão da ZH (estarão na região quente demais para manter água no estado líquido) enquanto que Júpiter e Saturno entrarão dentro da ZH.

Atualmente, a Terra é o único planeta que sabemos possuir água no estado líquido de forma permanente. No entanto, evidências observacionais apontam para a possível existência atual ou passada de água em outros planetas e luas do

Sistema Solar, mesmo que na forma de vapor ou gelo. A evidência mais recente é a de que possa existir grande quantidade de água subterrânea na região de Marte conhecida como Valles Marineris [12], obtida com o instrumento FREND [13] a bordo da missão ExoMars Trace Gas Orbiter [14].

No entanto, são as luas do Sistema Solar que apresentam maior interesse astrobiológico atualmente. De fato acredita-se na possível existência de um oceano de água líquida com mais água do que a Terra, sob uma camada de gelo em Europa, uma lua de Júpiter. Tal evidência foi descoberta pela missão Galileo⁴, da NASA, no final da década de 90. A missão Cassini⁵, também da NASA, foi a responsável por detectar erupções de plumas de gelo e vapor de água em Encélado, lua de Saturno, em 2005, também indicação de um possível oceano sob uma camada superficial de gelo. A mesma missão também foi responsável por estudar pela primeira vez a superfície de outra lua de Saturno, Titã, a qual descobriu ser coberta por corpos de hidrocarbonetos líquidos, além de ter encontrado evidências para a possível existência de água líquida subterrânea.

Apesar de estarem localizadas além da ZH do Sistema Solar, em uma região que fria demais para sustentar água superficial no estado líquido, os oceanos nestas luas poderiam se manter no estado líquido por não serem superficiais e talvez por terem níveis de salinidade diferentes do oceano terrestre. Além disso, como já mencionado anteriormente, a temperatura dos planetas e luas não depende unicamente da radiação da estrela, mas pode ser afetada por mecanismos internos, forças de maré, dentre outros.

O interesse astrobiológico destas luas motivou o desenvolvimento de novas missões espaciais previstas para a próxima década, como a Europa Clipper⁶, da NASA, que orbitará Júpiter, a Dragonfly⁷, também da NASA, que enviará um drone para sobrevoar Titã, e a JUICE⁸, da ESA, que estudará Júpiter e suas três maiores luas.

⁴<https://solarsystem.nasa.gov/missions/galileo>

⁵https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/main

⁶<https://europa.nasa.gov/>

⁷<https://www.nasa.gov/dragonfly>

⁸<https://sci.esa.int/web/juice>

3 Métodos de detecção de exoplanetas

Antes de listarmos exemplos de alguns exoplanetas interessantes em termos de habitabilidade, vamos primeiro descrever as técnicas que são utilizadas para detectar planetas fora do Sistema Solar.

Apesar de exoplanetas serem aparentemente muito comuns, ao menos na Via Láctea, o método de detecção conhecido como “imageamento direto”, que permite a obtenção de uma imagem do planeta, foi, até o momento, aplicado com sucesso a apenas algumas dezenas dos mais de 5000 exoplanetas conhecidos. Isso ocorre pois, além de estarem muito distantes e não emitirem luz própria, a radiação emitida pelas estrelas ofusca o brilho muito menor dos respectivos exoplanetas. De fato, a luz refletida por um exoplaneta pode ser milhões ou até bilhões de vezes mais tênue do que a luz emitida por sua estrela. Desta forma, até o momento, técnicas de medida indiretas (nas quais não “vemos” o planeta diretamente, mas inferimos a sua presença através de efeitos sobre o movimento ou a emissão das estrelas) têm sido responsáveis pela detecção da grande maioria dos exoplanetas conhecidos. Nesta seção, vamos descrever os dois principais métodos de detecção de exoplanetas utilizados até o momento, o do trânsito primário e o da velocidade radial, e comentar sobre outros métodos que também têm tido êxito nos últimos anos.

O método do trânsito planetário primário, utilizado pelas missões espaciais CoRoT, *Kepler*, K2 e TESS, e por diversos telescópios na Terra, foi o responsável pela descoberta de mais de 70% dos exoplanetas atualmente confirmados. Este método consiste na detecção da sutil diminuição do brilho das estrelas quando ocorre um trânsito planetário, ou seja, quando o exoplaneta cruza em frente da estrela, do nosso ponto de vista, como ilustrado na Figura 2. Para fins de comparação, um astrônomo fora do Sistema Solar observaria uma diminuição de $\sim 1\%$ no brilho do Sol durante um trânsito de Júpiter e de apenas $\sim 0,01\%$ durante um trânsito da Terra. Para que a variação do brilho da estrela possa ser percebida, é necessário que ela seja observada periodicamente, de modo a maximizar as chances de observá-la durante o trânsito. De fato, tipicamente, os trânsitos detectados ocorrem em um intervalo de tempo da ordem de horas e, para detectá-los, a missão *Kepler*, por exemplo, monitorava constantemente

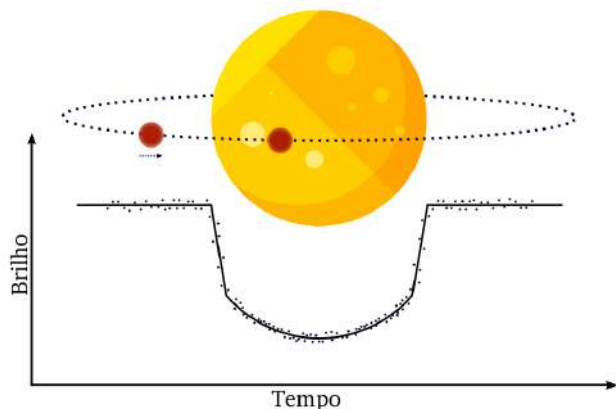


Figura 2: Ilustração da diminuição do brilho de uma estrela durante o trânsito de um planeta. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias [15].

o brilho de milhares de estrelas selecionadas.

A observação do trânsito de um planeta permite que sejam medidos o seu período orbital (o tempo que dura uma translação completa em torno da estrela) e o seu raio, pois este é proporcional à diminuição do brilho da estrela (a rigor, a diminuição do brilho é proporcional ao raio ao quadrado). Quanto mais próxima da estrela é a órbita do planeta, menor é o seu período orbital e mais frequentes serão os trânsitos, o que faz com que esse método de detecção preferencialmente detecte planetas grandes que orbitem próximo a estrelas menos luminosas.

O método da velocidade radial, diferentemente do método do trânsito primário, é sensível à massa do planeta, mas não ao seu raio. Neste método, que foi responsável pela descoberta de $\sim 20\%$ dos exoplanetas confirmados até o momento, não é possível determinar a massa do planeta, mas apenas a chamada “massa mínima”, que é aquela que o planeta teria se estiver orbitando a estrela com uma inclinação de 90° , ou seja, com órbita ao longo da direção que liga à estrela à Terra.

Diferentemente do trânsito primário, que é um método de detecção fotométrico (ou seja, que observa apenas a variação do brilho da estrela como um todo, mas não nos detalhes do brilho em diferentes faixas de comprimento de onda da luz), o método da velocidade radial é baseado em observações espectroscópicas da estrela, ou seja, a luz da estrela deve ser observada para cada comprimento de onda separadamente. De fato, não é estritamente correto afirmar que os planetas orbitam uma estrela pois, na realidade, todos orbitam

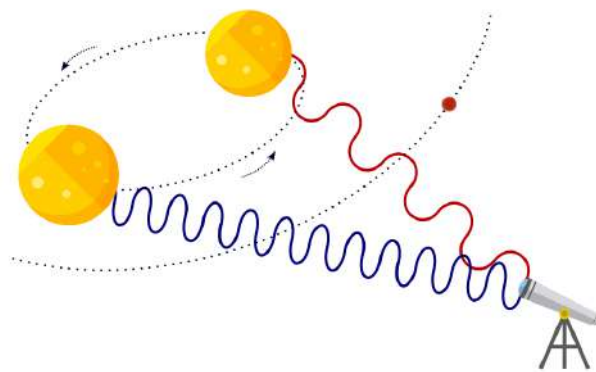
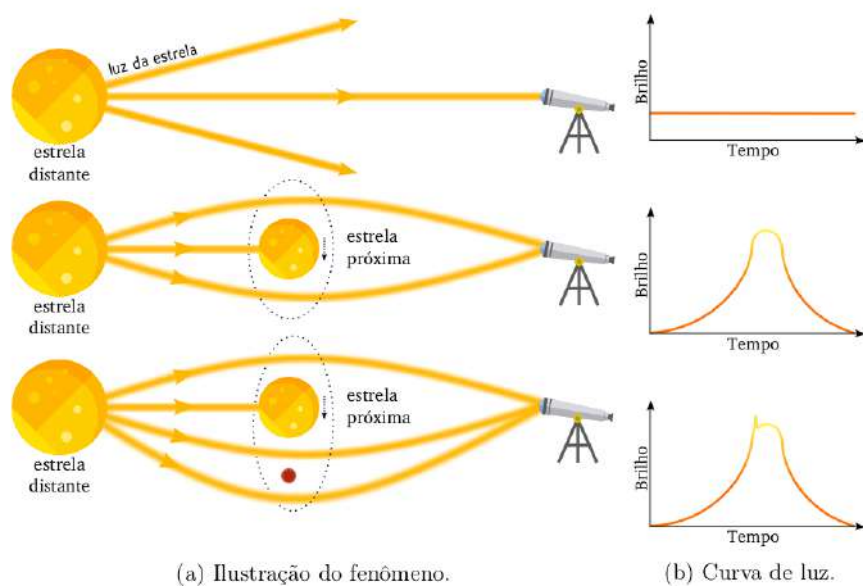


Figura 3: Ilustração do efeito Doppler observado na emissão de uma estrela que orbita o centro de massa do sistema planetário, em dois diferentes pontos da órbita de um de seus planetas, representado em vermelho. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias [15].

um ponto conhecido como “centro de massa” do sistema. Como, em geral, as estrelas têm massa muito maior do que as de seus planetas, a posição do centro de massa acaba, na prática, estando muito próxima da posição da estrela e o movimento que ela descreve em torno dele tem amplitude muito menor do que as órbitas dos planetas. O método da velocidade radial consiste na detecção espectroscópica desse movimento discreto da estrela em torno do centro de massa do sistema, como ilustrado na Figura 3. De fato, devido ao efeito Doppler, a frequência da luz emitida pela estrela sofrerá variações periódicas durante o movimento, que poderão ser observados espectroscopicamente. Como a posição do centro de massa da estrela será mais distante dela quanto menor for a razão entre sua massa e as massas dos seus planetas e quanto mais próximos eles orbitarem dela, o método da velocidade radial também tende a detectar planetas massivos próximos a estrelas menores e de baixa luminosidade.

Como esses dois métodos foram aqueles responsáveis pela maior parte das detecções de exoplanetas, foram descobertos muitos planetas da classe dos chamados “Júpiteres quentes” (*hot Jupiters*), planetas grandes que orbitam próximo às suas estrelas, com períodos orbitais de horas ou poucos dias. Um exemplo de um planeta com essas características é 51 Pegasi b, o primeiro exoplaneta descoberto orbitando uma estrela semelhante ao Sol.

O método responsável pelo terceiro maior número de detecções de exoplanetas ($\sim 3\%$ dos exo-



(a) Ilustração do fenômeno.

(b) Curva de luz.

Figura 4: Ilustração da detecção de um exoplaneta pelo método de microlenteamento gravitacional. Nas imagens da esquerda, a luz de uma estrela distante é lenteada pela passagem de uma estrela mais próxima (que faz o papel de lente) na sua frente. Durante a passagem, o brilho da estrela mais distante sofre um aumento e, quando há um planeta orbitando a estrela mais próxima, a curva de luz da estrela mais distante apresenta um pico característico, como pode ser visto nas imagens da direita. Crédito: Raquel Gomes Gonçalves Farias [15].

planetas confirmados até o momento) é o de microlenteamento gravitacional, no qual a observação de uma pequena variação no brilho de uma estrela distante indica que a estrela que faz o papel de lente possui um planeta, como ilustrado na Figura 4. O fenômeno conhecido como “lenteamento gravitacional”, descrito pela teoria da relatividade geral, ocorre quando a luz de corpos celestes distantes é defletida pelo efeito gravitacional de outros corpos localizados entre eles e a Terra (que exercem efeito similar ao de uma lente). Quando esse fenômeno ocorre com galáxias e aglomerados de galáxias, é possível observar imagens distorcidas dos objetos mais distantes, os chamados “arcos gravitacionais” ou até mesmo imagens múltiplas de um mesmo objeto. O microlenteamento gravitacional é o lenteamento de estrelas, que produz variações no brilho de estrelas distantes quando corpos celestes passam entre elas e a Terra. Durante a passagem do corpo celeste, o brilho da estrela distante sofre uma magnificação, como ilustrado no quadro do meio da Figura 4. Se esse corpo celeste for uma estrela que possui um ou mais planetas, a gravidade do planeta também afetará a trajetória da luz da estrela distante e a haverá uma magnificação adicional em seu brilho, como ilustrado no painel inferior da Figura 4. Como os efeitos

de lenteamento estão relacionados ao campo gravitacional dos corpos que atuam como lentes, a detecção de um exoplaneta através desse método permite a determinação de sua massa.

O restante das detecções de exoplanetas foi realizado com métodos promissores mas ainda pouco produtivos, tais como os métodos de variação temporal (TTV - *Transit Timing Variation* - e TDV - *Transit Duration Variation*) [16], que detectam exoplanetas através da observação de pequenas variações na periodicidade e na duração nos trânsitos de outro exoplaneta já conhecido do mesmo sistema planetário. Em outro método de detecção conhecido como *eclipse timing variation* (ver, por exemplo, [17]), que já foi aplicado a algumas dezenas de exoplanetas, são detectadas pequenas perturbações na órbita de um sistema de estrelas binárias eclipsantes devido à presença de exoplanetas. Outros métodos como o de astrometria, em que procura-se por perturbações no movimento de uma estrela devido à presença de exoplanetas, e de trânsito secundário, em que observa-se a queda no brilho do sistema estrela + planeta quando o planeta está atrás da estrela, ainda não produziram muitos resultados.

Muitos dos exoplanetas conhecidos já foram observados com mais de um dos métodos descritos acima, o que permite a obtenção de uma

maior quantidade de informação sobre eles. A detecção de um planeta pelos métodos de trânsito primário e velocidade radial, por exemplo, permite a determinação de sua massa verdadeira, e não apenas de sua massa mínima, além do seu período orbital e raio.

Atualmente, existe também grande expectativa para a descoberta de luas fora do Sistema Solar, as chamadas exoluas. Sabemos que no Sistema Solar existem mais de 200 satélites naturais ao redor dos planetas, sendo, portanto, razoável, acreditar que o mesmo fenômeno ocorra ao menos em alguns dos milhares de sistemas planetários já descobertos. Apesar de nenhuma exolua ter sido ainda confirmada até o momento, espera-se que as técnicas de TTV e TDV possam gerar resultados na próxima década.

4 Exoplanetas habitáveis

Diante das atuais limitações observacionais e para fins de uma procura ampla por exoplanetas habitáveis, vamos considerar um exoplaneta interessante do ponto de vista astrobiológico quando ele é rochoso e se encontra dentro da ZH de sua estrela. Quanto mais semelhante à Terra, em termos de tamanho, massa e radiação recebida da estrela, mais interessante ele se torna.

Na Figura 5 é possível ver o raio e a massa (ou massa mínima) de 976 exoplanetas que possuem esses parâmetros medidos. Os dados foram extraídos da base de dados *Nasa Exoplanet Archive*⁹, que reúne informação sobre todos os exoplanetas confirmados e os candidatos. É possível notar que os exoplanetas parecem se separar no gráfico em dois grupos distintos: um na parte esquerda e inferior do gráfico (valores menores de massa e raio) e outro na parte direita superior do gráfico (maiores valores de massa e raio). Essa separação corresponderia à diferentes composições dos planetas, sendo os rochosos menores e com menos massa e os gigantes maiores e mais massivos. Os pontos vermelho e azul correspondem à posição no gráfico de Júpiter e da Terra, respectivamente, que são exemplos de um planeta gigante e um rochoso no Sistema Solar.

A fim de determinar quantos desses planetas são habitáveis, vamos utilizar dados atualizados em dezembro de 2021 do catálogo “The Habita-

ble Exoplanets Catalog”¹⁰, mantido pela Universidade de Porto Rico em Arecibo. Nele, consta um total de 59 exoplanetas classificados como potencialmente habitáveis por estarem dentro da ZH otimista de suas estrelas e por terem raios entre $0,5R_{\oplus}$ e $3R_{\oplus}$ ($R_{\oplus} \simeq 6370$ km é o raio da Terra) e massa (ou massa mínima) entre $0,1M_{\oplus}$ e $10M_{\oplus}$ ($M_{\oplus} \simeq 5,9 \times 10^{24}$ kg é a massa da Terra). A região cinza na Figura 5 é delimitada pelos valores de massa e raio citados acima e os pontos coloridos representam os 59 planetas potencialmente habitáveis. Notem que alguns planetas se encontram dentro da região cinza, ou seja, possuem valores de massa e raio dentro da faixa especificada, porém não satisfazem o critério de se estarem localizados dentro da ZH de suas estrelas.

Dos 59 exoplanetas potencialmente habitáveis, 21 têm maior probabilidade de serem rochosos (representados em verde na Figura 5 e listados na tabela da Figura 6), pois apresentam raios entre $0,5R_{\oplus}$ e $1,6R_{\oplus}$ e massas entre $0,1M_{\oplus}$ e $3M_{\oplus}$. Estes planetas pertencem todos à classe de exoplanetas similares à Terra (*Earth-like*), com exceção de TRAPPIST-1 d que é menos massivo e tem tamanho similar ao de Marte. Os outros 38 exoplanetas da lista são classificados como “super-Terras” ou “mini-Netunos”, classes de planetas com valores de massa e raio entre os da Terra e os de Netuno, que são encontrados no Sistema Solar.

Na Figura 6 é possível notar que os nomes do exoplanetas são sempre compostos pelo nome da estrela e uma letra minúscula (a partir da letra “b”, visto que se considera que a letra “a” denota a própria estrela), que denota a ordem de descoberta do planeta naquele sistema. Dentre estes 21 exoplanetas com maior probabilidade de serem rochosos, alguns se tornaram muito conhecidos na literatura. O sistema planetário da estrela TRAPPIST-1 [18], por exemplo, que foi descoberto em 2016 pelo telescópio Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) [19], localizado no Chile, contém 7 planetas rochosos. Suas massas variam entre $\sim 0,3M_{\oplus}$ e $\sim 1,4M_{\oplus}$ e seus raios variam entre $\sim 0,7R_{\oplus}$ e $\sim 1,1R_{\oplus}$. Destes 7 planetas, 4 estão dentro da ZH, de acordo com o “The Habitable Exoplanets Catalog” e recebem radiação da sua estrela que corresponde a valores entre 25% e 112% da ra-

⁹<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

¹⁰<https://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

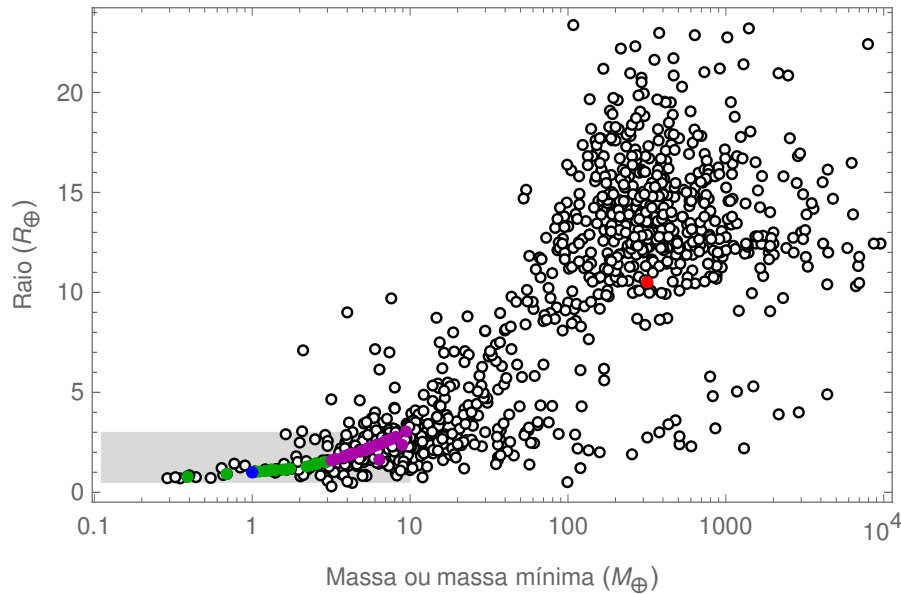


Figura 5: Raio como função da massa (ou massa mínima) para 976 exoplanetas com esses parâmetros disponíveis na base de dados NASA Exoplanet Archive. A região em cinza representa os limites de raio e massa impostos para obter o conjunto de 59 exoplanetas potencialmente habitáveis, de acordo com o The Habitable Exoplanets Catalog. Os pontos verdes e roxos representam esses 59 planetas, sendo os verdes aqueles considerados com maior probabilidade de serem rochosos. Os pontos azul e vermelho representam a posição no gráfico da Terra e de Júpiter respectivamente.

dição recebida na Terra pelo Sol. No entanto, por orbitarem uma estrela do tipo anã M, que já vimos ser menor e menos massiva que o Sol, esses planetas estão tão próximos da estrela (com órbitas com raios entre $\sim 0,01$ UA e $\sim 0,06$ UA), que espera-se que estejam em rotação síncrona com ela. [20] apresenta uma revisão sobre esse sistema planetário e considerações sobre a sua habitabilidade. O recém lançado telescópio espacial *James Webb* [21] tem como um dos seus principais objetivos a caracterização das atmosferas dos planetas do sistema TRAPPIST-1 e esperamos que, em breve, saibamos mais sobre as características desse sistema planetário.

Podemos utilizar o chamado “índice de similaridade com a Terra” (*Earth Similarity Index*, ESI) [22], que varia entre 0 e 1, para quantificar o nível de semelhança entre um planeta e a Terra. Quanto mais próximo de 1 for o índice ESI de um planeta, maior é a semelhança entre ele e a Terra. De acordo com o “The Habitable Exoplanets Catalog”, que calcula este índice levando em consideração o raio, a densidade, a velocidade de escape e a temperatura superficial do exoplaneta, os planetas dentro da ZH do sistema TRAPPIST-1 possuem ESI entre 0,58 e 0,91. Para comparação, os valores do índice ESI para Marte e Vênus são 0,70 e 0,44 respectivamente.

Os planetas listados na Figura 6 estão dispostos em ordem decrescente do índice ESI. Vemos que o exoplaneta atualmente com maior índice ESI é o Teegarden b, com ESI de 0,95. Este planeta, que orbita a estrela anã M de Teegarden, possui raio estimado de $1,02 R_{\oplus}$, massa mínima de $1,05 M_{\oplus}$ e recebe de sua estrela aproximadamente 1,15 vezes o fluxo solar recebido pela Terra. Em seguida, vêm os exoplanetas TOI-700 d e Kepler-1649 c, que também orbitam estrelas anãs M e possuem ESI de 0,93 e 0,92 respectivamente. A sigla “TOI” significa “TESS *Object of Interest*” e TOI-700 d foi o primeiro planeta rochoso dentro da ZH descoberto pela missão TESS. Ele recebe de sua estrela aproximadamente 87% da radiação recebida pela Terra do Sol porém, assim como ocorre com os planetas do sistema TRAPPIST-1, acredita-se que ele esteja em rotação síncrona com sua estrela. O exoplaneta Kepler-1649 c, por sua vez, foi descoberto apenas em 2020, durante uma reanálise dos dados obtidos pela missão Kepler. É interessante mencionar também que Proxima Centauri b, que se encontra no sistema planetário mais próximo do Sistema Solar, tem raio estimado de $1,08 R_{\oplus}$, massa mínima de $1,27 M_{\oplus}$ e se encontra dentro da ZH de sua estrela. Proxima Centauri b possui ESI de 0,87 e

Nome	M (M_{\oplus})	R (R_{\oplus})	ESI
● Terra	1	1	1
● Teegarden b	1,05	1,02	0,95
● TOI-700 d	1,57	1,14	0,93
● Kepler-1649 c	1,20	1,06	0,92
● TRAPPIST-1 d	0,39	0,78	0,91
● Proxima Centauri b	1,27	1,08	0,87
● K2-72 e	2,21	1,29	0,87
● GJ 1061 d	1,64	1,15	0,86
● GJ 1061 c	1,74	1,18	0,86
● Ross 128 b	1,40	1,11	0,86
● GJ 273 b	2,89	1,51	0,85
● Kepler-296 e	2,96	1,52	0,85
● TRAPPIST-1 e	0,69	0,92	0,85
● Kepler-442 b	2,36	1,35	0,84
● GJ 667 C f	2,54	1,45	0,76
● Kepler-62 f	–	1,41	0,68
● TRAPPIST-1 f	1,04	1,04	0,68
● Teegarden c	1,11	1,04	0,68
● Kepler-1229 b	2,54	1,40	0,62
● Kepler-186 f	1,71	1,17	0,61
● GJ 667 C e	2,54	1,45	0,60
● TRAPPIST-1 g	1,32	1,13	0,58

Figura 6: Lista dos 21 exoplanetas com maior índice ESI de acordo com o The Habitable Exoplanets Catalog. A primeira linha contém as informações do planeta Terra, para fins de comparação. Na primeira coluna contém um círculo que representa o tamanho de cada exoplaneta, a ser comparado com o círculo na primeira linha, que representa o tamanho da Terra. As outras colunas contêm o nome, a massa (ou massa mínima), em unidades de massa da Terra, o raio, em unidades de raio da Terra, e o índice ESI de cada exoplaneta.

5 Perspectivas

O estudo das zonas habitáveis estelares auxilia na seleção de planetas a serem analisados de forma mais detalhada porém, estar dentro da zona habitável não garante que um planeta seja habitável e, por sua vez, ser habitável não garante que o planeta seja habitado. A detecção das chamadas “bioassinaturas” ou das “tecnoassinaturas” é a aposta atual para uma eventual confirmação da existência de vida fora da Terra. Enquanto bioassinaturas consistem em evidências que indiquem atividade biológica, as tecnoassinaturas são indícios da existência de uma civilização avançada, como por exemplo o uso de tecnologia ou evidências de atividade industrial.

Atualmente, existe grande expectativa pela

descoberta de bioassinaturas através da análise da atmosfera de exoplanetas. Essas bioassinaturas consistiriam na detecção da existência de algumas moléculas que na Terra estão associadas à vida, como o ozônio e o metano, por exemplo, na atmosfera desses planetas. A hipótese da existência de vida nas nuvens de Vênus, baseada na detecção da molécula de fosfina [23], é um exemplo da procura por uma bioassinatura na atmosfera desse planeta. Espera-se que o telescópio espacial *James Webb* em breve apresente resultados sobre as características das atmosferas de exoplanetas próximos.

Outros tipos de bioassinaturas também podem indicar a existência de vida em outro planeta, como por exemplo a eventual detecção da variação sazonal da refletividade de sua superfície, que pode estar relacionada a variações na cobertura vegetal do planeta em diferentes estações do ano. A grandeza conhecida como “albedo” planetário é uma medida dessa refletividade, mas não leva em conta apenas a refletividade da superfície do planeta, mas sim a refletividade global, que pode ser afetada, por exemplo, pela existência de nuvens.

A procura por tecnoassinaturas atualmente tem se concentrado na procura por emissões eletromagnéticas que indiquem a existência de vida inteligente fora da Terra. O maior exemplo é o programa SETI¹¹, que desde a década de 80 procura por sinais de rádio emitidos por civilizações extraterrestres, usando radiotelescópios em diferentes continentes. O anúncio de um possível sinal de rádio proveniente do sistema Proxima Centauri em 2021 [24] é um exemplo do que poderia ser uma tecnoassinatura. Essa descoberta, que foi descartada posteriormente, foi realizada como parte do programa Breakthrough Listen¹², que teve início em 2016.

Além dos programas já mencionados, o advento de instrumentos cada vez mais precisos, como por exemplo o espectrógrafo CODEX (*COsmic Dynamics and EXo-earth experiment*) [25], que será instalado no telescópio ELT¹³ (Extremely Large Telescope) com previsão para iniciar operação em 2025, e futuras missões espaciais como a PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars, prevista para 2026, com participação brasileira) [26], esperamos que se inicie uma nova fase

¹¹<https://www.seti.org/>

¹²<https://breakthroughinitiatives.org/initiative/1>

¹³<https://elt.eso.org/>

no estudo dos exoplanetas e na procura por vida fora da Terra.

Agradecimentos

A autora gostaria de agradecer os membros do grupo de pesquisa RioAstroBio, em particular à doutoranda Raquel Gomes Gonçalves Farias que, gentilmente, preparou as figuras que ilustram os métodos de detecção de exoplanetas apresentadas neste trabalho.

Sobre a autora

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

Referências

- [1] A. Wolszczan e D. A. Frail, *A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12*, *Nature* **355**(6356), 145 (1992).
- [2] M. Mayor e D. Queloz, *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*, *Nature* **378**(6555), 355 (1995).
- [3] R. Di Stefano et al., *A possible planet candidate in an external galaxy detected through X-ray transit*, *Nature Astronomy* **5**, 1297 (2021).
- [4] W. J. Borucki et al., *Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results*, *Science* **327**(5968), 977 (2010).
- [5] S. B. Howell et al., *The K2 Mission: Characterization and Early Results*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **126**(938), 398 (2014). [ArXiv:1402.5163](https://arxiv.org/abs/1402.5163).
- [6] M. Auvergne et al., *The CoRoT satellite in flight: description and performance*, *Astronomy & Astrophysics* **506**(1), 411 (2009). [ArXiv:0901.2206](https://arxiv.org/abs/0901.2206).
- [7] G. R. Ricker et al., *Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)*, *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **1**, 014003 (2015).
- [8] J. Schneider et al., *Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database*, *Astronomy & Astrophysics* **532**, A79 (2011). [ArXiv:1106.0586](https://arxiv.org/abs/1106.0586).
- [9] J. F. Kasting, D. P. Whitmire e R. T. Reynolds, *Habitable Zones around Main Sequence Stars*, *Icarus* **101**(1), 108 (1993).
- [10] R. K. Kopparapu et al., *Habitable Zones around Main-sequence Stars: New Estimates*, *Astrophys. J.* **765**(2), 131 (2013). [ArXiv:1301.6674](https://arxiv.org/abs/1301.6674).
- [11] R. K. Kopparapu et al., *Habitable Zones around Main-sequence Stars: Dependence on Planetary Mass*, *Astrophys. J. Letters* **787**(2), L29 (2014). [ArXiv:1404.5292](https://arxiv.org/abs/1404.5292).
- [12] I. Mitrofanov et al., *The evidence for unusually high hydrogen abundances in the central part of valles marineris on mars*, *Icarus* **374**, 114805 (2022).
- [13] I. Mitrofanov et al., *Fine resolution epithermal neutron detector (frend) onboard the exomars trace gas orbiter*, *Space Science Reviews* **214** (2018).
- [14] J. Vago et al., *ESA ExoMars program: The next step in exploring Mars*, *Solar System Research* **49**, 518 (2015).
- [15] R. G. G. Farias, *Influência de características orbitais e atmosféricas na estabilidade da temperatura de exoplanetas*, Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharelado em Ciências Biológicas: Biotecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2019).

- [16] D. M. Kipping, *Transit timing effects due to an exomoon*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **392**(1), 181 (2009). [ArXiv:0810.2243](#).
- [17] J. W. Lee et al., *The sdB+M Eclipsing System HW Virginis and its Circumbinary Planets*, *Astronom. J.* **137**(2), 3181 (2009). [ArXiv:0811.3807](#).
- [18] M. Gillon et al., *Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1*, *Nature* **542**(7642), 456 (2017). [ArXiv:1703.01424](#).
- [19] M. Gillon et al., *Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star*, *Nature* **533**(7602), 221 (2016). [ArXiv:1605.07211](#).
- [20] M. Turbet et al., *A Review of Possible Planetary Atmospheres in the TRAPPIST-1 System*, *Space Science Reviews* **216**(5), 100 (2020). [ArXiv:2007.03334](#).
- [21] D. R. Louie et al., *Simulated JWST/NIRISS Transit Spectroscopy of Anticipated Tess Planets Compared to Select Discoveries from Space-based and Ground-based Surveys*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **130**(986), 044401 (2018). [ArXiv:1711.02098](#).
- [22] D. Schulze-Makuch et al., *A Two-Tiered Approach to Assessing the Habitability of Exoplanets*, *Astrobiology* **11**(10), 1041 (2011).
- [23] J. S. Greaves et al., *Phosphine gas in the cloud decks of Venus*, *Nature Astronomy* **5**, 655 (2021). [ArXiv:2009.06593](#).
- [24] S. Smith et al., *A radio technosignature search towards Proxima Centauri resulting in a signal of interest*, *Nature Astronomy* **5**, 1148 (2021). [ArXiv:2111.08007](#).
- [25] L. Pasquini et al., *CODEX: the high-resolution visual spectrograph for the E-ELT*, in *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, editado por I. S. McLean e M. M. Casali, International Society for Optics and Photonics (SPIE, 2008), vol. 7014, 573 – 581.
- [26] H. Rauer et al., *The PLATO 2.0 mission*, *Experimental Astronomy* **38**(1-2), 249 (2014). [ArXiv:1310.0696](#).

Os limites para a vida na biosfera terrestre

Jorge E. Horvath

Universidade de São Paulo

Resumo

Apresentamos neste artigo um panorama dos limites físicos que os organismos vivos podem suportar para se desenvolver, em termos de temperatura, pressão, acidez e outros parâmetros importantes. Discutimos também a recente avaliação quantitativa das biomassas de cada grupo e a questão dos organismos quimioautotróficos.

Abstract

We present in this article a broad overview of the physical limits in which living organisms can bear to develop in terms of temperature, pressure acidity and other important parameters. We also discuss the recent quantitative evaluation of biomasses of each living group and the issue of chemoautotrophic organisms.

Palavras-chave: biosfera terrestre, astrobiologia, origem da vida.

Keywords: terrestrial biosphere, astrobiology, origin of life.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38512](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38512)

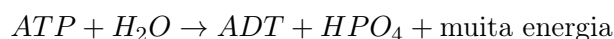
1 Introdução

Pela nossa condição de mamíferos macroscópicos é inevitável que a maior parte de nós tenha uma visão antropocêntrica da vida no planeta Terra. Pensamos em termos de animais e plantas que conhecemos como “os seres vivos” na maior parte do tempo, embora saibamos muito bem que existem micro-organismos em quantidade na biosfera, muitos deles fundamentais para nossa própria existência. Mais ainda, este último grupo pertence principalmente ao reino dos *procariontes*, embora existem *eucariontes* unicelulares que não são plantas, fungos nem animais. Esta classificação moderna de “seis Reinos” (Fig. 1) é uma evolução natural da antiga visão, e agora fortalecida pelo conhecimento fornecido pela Biologia Molecular de enorme desenvolvimento nas últimas décadas.

Levando em conta que boa parte dos seres vivos é microscópica, cabe assim perguntarmos pela *distribuição* da biomassa, ou massa dos seres vivos, e se ela é diferente em diferentes ambientes da biosfera. E também por uma questão intimamente relacionada: que tipo de metabolismo(s)/fontes de energia alimentam estas criaturas? Até há pouco tempo tínhamos por verdadeiro que a fotossíntese era o mecanismo fundamental e básico das chamadas *cadeias trópicas*, no sentido que os produtores primários eram todos

organismos fotossintéticos. Porém, a descoberta bastante recente de seres *quimioautotróficos* que se alimentam de reações químicas, e não precisam em absoluto da luz solar, foi confirmada e modificou bastante essa percepção.

Se há um fato “unificador” das formas de vida dos seis Reinos, certamente é a utilização universal por todos os organismos conhecidos da molécula de *ATP* (trifosfato de adenina) para estocar energia e entregá-la quando alguma enzima a necessite para metabolizar o alimento. Quando a energia não é requerida, o *ATP* se recombina, já que atua como uma *bateria química* que reside nas mitocôndrias. O tipo de reação que libera energia para o metabolismo funcionar é



onde o *ADT* é o difosfato de adenina. Agora bem, tanto os organismos fotossintéticos quanto os quimiossintéticos precisam sintetizar *ATP* como parte essencial do funcionamento do seu metabolismo, seja qual for.

Notavelmente, estes organismos quimioautotróficos são também fortes candidatos a serem a primeira forma de vida na Terra, se esta se desenvolveu independentemente no nosso planeta. Adquire assim significação especial a questão geral dos extremófilos, ou seja, da adaptação da vida a ambientes extremos (os quimioautótrofos são

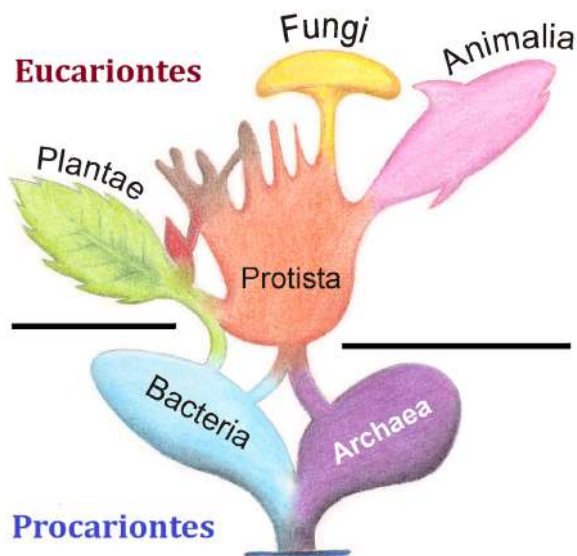


Figura 1: Os “Seis Reinos” separados pela divisão fundamental entre células com núcleo (eucariontes) e sem núcleo (procariontes). A classificação tem alguns problemas evidentes, por exemplo, um protista é qualquer eucarionte que não seja um fungo, animal ou planta, mas as relações com estes últimos (representada pelos elos na figura) podem ser mais fundamentais que entre outros protistas entre si, já que não parecem ser um grupo “natural”. Para muitos biólogos qualquer unicelular eucarionte é, de fato, um protista. Adaptada da Ref. [1].

quase todos extremófilos). Todas estas questões serão objeto deste artigo geral.

2 A vida nos extremos

Devido às nossas próprias condições de vida, temos uma tendência a pensar que ambientes muito frios ou quentes, muito ácidos ou alcalinos ou com altas doses de radiação ultravioleta ou radioatividade são inóspitos e inabitáveis. Porém, esta perspectiva é muito limitada e em geral, errônea: na verdade, os organismos que habitam ambientes extremos (os *extremófilos*) estão adaptados a eles de tal forma que se encontram perfeitamente confortáveis, e nem sobreviveriam em condições mais "amenas". Há inúmeros exemplos, tanto em bactérias e fungos quanto até em mamíferos do tipo o urso polar, que se desenvolvem muito bem com temperaturas de -20°C ou -30°C . Usando uma frase do Prof. D. Gili-chinsky da Academia de Ciências Russa: "os ambientes nunca são extremos para seus habitantes, somos nós os frouxos..."

Diversos ambientes do planeta têm sido coloni-

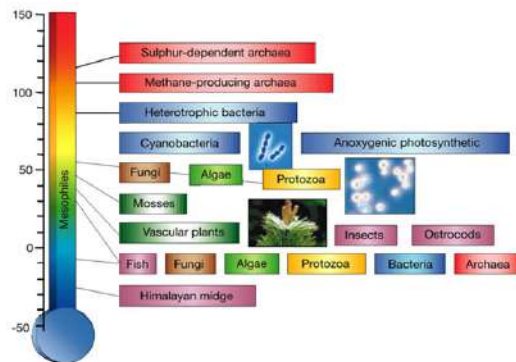


Figura 2: Organismos extremófilos nos extremos da temperatura dos ambientes. A mosca do Himalaia é o recorde negativo, embora existam várias algas, fungos, bactérias, archeas e até peixes que vivem sem problema em temperaturas moderadamente negativas. No outro extremo encontramos as archeas que metabolizam sulfatos e metano, vivendo em ambientes de até uns 120°C . Há registros de unicelulares que vivem em ambientes de quase 200°C .

zados pela vida que extrai energia principalmente da fotossíntese, mas se esta não for possível pela ausência de luz suficiente, descobrimos que a vida recorre a se alimentar por meio de *reações químicas*, que podem ser iniciadas pela radioatividade. O estudo e classificação destes organismos extremófilos resultou na determinação de *limites físicos* dos ambientes (embora é possível que, no futuro, possam ser descobertos casos que superem estes limites). As formas de vida que vivem em ambientes extremos em mais de um parâmetro podem ser denominadas *multiextremófilas*.

Começamos pela resistência à temperatura. A Fig. 2 mostra os organismos recorde no extremo frio e quente da temperatura média do ambiente. Os organismos mais resistentes, que podem viver com calor extremo de $\sim 120^{\circ}\text{C}$, são archeas que metabolizam sulfatos e produzem metano, ou que se alimentam do próprio metano. No entanto, no extremo oposto uma pequena mosca dos Himalaias resiste -30°C ou mais sem ser afetada. Uma variedade de peixes, fungos, bactérias, algas e protozoários vivem sem problemas em temperaturas de -10°C e outros (a exemplo do urso polar já mencionado) podem resistir temperaturas ainda menores, mas por tempo limitado. Vemos que nossa "temperatura de conforto" humana, algo entre 0°C e 25°C , é muito quente para estes últimos e muito fria para as archeas hipertermófilas que vivem em gêiseres e ambientes de alta temperatura.

Outra condição importante para a vida é o *pH*

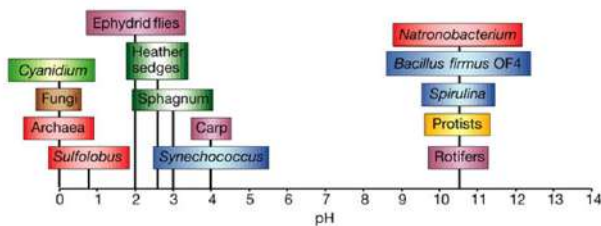


Figura 3: Organismos extremófilos no que diz a alcalinidade ou acidez do meio no qual vivem. A vida se desenvolve com sucesso tanto em meios muito ácidos (esquerda) ou muito alcalinos ou básicos (direita).

do meio. O pH é uma medida desenvolvida pelos químicos para medir a acidez ou alcalinidade. O valor $pH = 7$ é o ponto zero, onde o meio não é nem alcalino nem ácido. Valores maiores que 7 indicam um meio alcalino (também chamado de básico), e inferiores a 7 um meio ácido. Na Fig. 3 são mostrados os organismos que ocupam esta faixa de pH , de 0 até 10 aproximadamente. Ao que parece, nenhuma membrana celular existente resiste uma alcalinidade maior, mas no extremo oposto da acidez há mecanismos que permitem às células prosperarem.

Nas maiores pressões possíveis no planeta, no fundo dos oceanos, é possível achar micro-organismos, mas também vários peixes e formas de vida macroscópicas, que suportam pressões de até 500 atm. Para efeitos de comparação, esmagar uma lata de cerveja com as mãos requer somente umas 20 atmosferas. Nenhum submarino militar vai muito além dos 1000 m de profundidade. Os batiscafos de pesquisa têm ido além dos 10.000 m na Fossa das Marianas, mas com desenho e construção cuidadosamente executados, suportando umas 1000 atm.

A resistência à radiação UV é também outra característica que permite os organismos viverem em ambientes de elevada exposição solar e baixa coluna de ar, por exemplo, nos desertos em altitudes acima de 3000 m. Um dos “campeões” destes ambientes é a bactéria *Deinococcus Radiodurans* (Fig. 4), que pode viver em ambientes onde a dose de UV mataria rapidamente qualquer mamífero. O segredo deste e outros poucos unicelulares similares parece ser uma combinação da genética (já que têm um gene que repara rapidamente os danos ao DNA produzido pelos fótons ultravioletas), e estrutura, já que conta com uma espécie de blindagem das partes fundamentais, proteínas únicas e numerosas sequências



Figura 4: Esquerda: como exemplo de organismo viável em pressões extremas, o peixe dente-de-presas da imagem é achado nas profundezas oceânicas abaixo de 4.000 m, onde as pressões são de até 500 atmosferas. Direita: a bactéria *Deinococcus Radiodurans*, paradigma de resistência à radiação UV fotografada com microscópio.



Figura 5: Esquerda: um ambiente quente e ácido na superfície terrestre, no qual várias espécies de hipertermófilos vivem e prosperam. Direita: uma fonte hidrotermal submarina, ambientes candidatos a ter abrigado os primeiros organismos vivos da Terra. Nesta hipótese, os hipertermófilos surgiram aqui e foram se adaptando a ambientes menos extremos devido à evolução Darwiniana.

de nucleotídeos duplicadas. Há alguns anos uma equipe brasileira identificou cepas no deserto de Atacama [2] (principalmente *Cryptococcus friedmannii*, *Exophiala sp.*, *Holtermanniella waticus* e *Rhodospiridium toruloides*) que resistiram doses muito altas de radiação, e assim ganharam o apelido de “bactérias marcianas”, já que poderiam viver tranquilamente na superfície de Marte com uma atmosfera muito tênue, similar à da altitude de Atacama. Outros exemplos de ambientes extremos onde os organismos se desenvolvem sem problemas se mostram na Fig. 5.

Para finalizar este tópico, podemos nos referir às descobertas recentes de micro-organismos achados em minas na África do Sul a mais de 3.000 m de profundidade, onde não há absolutamente nenhuma luz solar que as alimente. Na Fig. 6 (direita) vemos um minerador sul-africano ao lado de uma colônia de organismos deste tipo. Como comprovou-se que a fonte de energia que viabiliza esta forma de vida é a redução de sulfatos fornecidos pela *radiólise* da água, e este último processo se deve ao decaimento radioativo dos elementos nas rochas, em última instância essas bactérias “comem radioatividade”, já que sem esta



Figura 6: Esquerda: um esquema do lago subglacial Vostok na Antártida. Direita: a mancha branca constitui uma colônia de bactérias que reduzem sulfatos liberados pelo decaimento radioativo dos elementos das rochas.

não poderiam se alimentar. Este tipo de descoberta, de organismos quimioautotróficos, levou a pensar que do subsolo até as profundezas, a biosfera poderia abrigar uma biomassa comparável à da que tem a fotossíntese como processo exclusivo de fonte de energia (vide seção 3). O ecossistema isolado do lago Vostok (Antártida) é outra descoberta complementar de grande interesse, já que resulta um análogo das luas geladas de Júpiter e possivelmente dos lagos subterrâneos de Marte. A mais de 5.000 m de profundidade abaixo do gelo antártico achou-se um ecossistema inteiro com espécies desconhecidas [3], isoladas do resto da biosfera há muitos milênios, pelo menos desde a última glaciação, embora houve quem defendesse um tempo muito mais longo. O fato é que, apesar da controvérsia a respeito da contaminação das brocas que furaram o gelo, foram achadas abundantes formas de vida extremas (por exemplo, os criptoendolitos como o *Bacillus infernus*, cujo nome é mais que sugestivo) e micro-organismos não identificados, o qual reforça a ideia da componente subterrânea extrema do planeta.

Uma extensão interessante, ainda que especulativa, é que a radiólise poderia acontecer em ambientes extraterrestres com iluminação inexistente(ou quase) da estrela central. Por exemplo, Altair, de Avellar, Rodrigues e Galante [4] mostraram que seria razoável esperar que este tipo de vida existisse nos satélites jovianos Europa e Encélado, se as condições fossem as mesmas que as dos organismos conhecidos na Terra. Este tipo de proposta não deixa de depender da presença de água líquida, mas dispensa por completo uma fonte de energia que permita a fotossíntese.

3 Avaliações da biomassa

Muitas vezes foi escrito que a Terra era “O Planeta dos Unicelulares”, no sentido que a maior parte da biomassa era suspeita de ser constituída por organismos deste tipo. Certamente não conhecemos mais que uns 10% ou menos do total das espécies procariontes (isto se repete com os insetos e outras classes), mas o número de espécies não tem por quê automaticamente levar à deter a maior parte da biomassa. Assim, esta questão precisou ser aprofundada.

Outra questão que emergiu com a descoberta dos quimioautotróficos é a da *fração* da biomassa que eles representam. Houve sugestões de que os quimioautotróficos seriam tão abundantes em massa quanto os fotoautotróficos (plantas, cianobactérias e outros), mas que permaneceriam “escondidos” no subsolo ou em profundidades maiores.

Estas controvérsias têm sido agora abordadas quantitativamente por Bar, Phillips e Milo [5]. O trabalho mostrou de forma convincente que: a) a biomassa é muito dependente do ecossistema considerado, o qual era esperado; e b) que a maior biomassa total da Terra está nas plantas, que superam por muito a soma dos procariontes e os protistas. Estes resultados se mostram no diagrama da Fig. 7. Portanto, somente haveria uma reviravolta se os micro-organismos no subsolo profundo somassem uma biomassa de mais de 350 bilhões de toneladas de carbono, o qual parece improvável. De passagem, a questão da componente da biosfera que recorre à síntese química fica mais esclarecida: sua biomassa é importante, mas ainda que fossem o total das espécies desconhecidas, não devem dominar o balanço total.

Em conclusão, os extremófilos indicam caminhos evolutivos de grande interesse, já que não tão somente podem ter sido os primeiros organismos da vida na Terra, mas também poderiam ser indicativos do que podemos nos encontrar em ambientes extraterrestres, tais como Marte ou as luas de Júpiter. Existem evidências de depósitos devidos a fontes hidrotermais como as da Fig. 5 com idades de quase 3,5 Giga anos [6]. A presença de água na superfície marciana primitiva é também firme, e faz pensar que os extremófilos hipertermófilos podem ter sido comuns à Terra e Marte, embora as bioassinaturas não sejam ainda completamente identificadas e dificultem a busca.

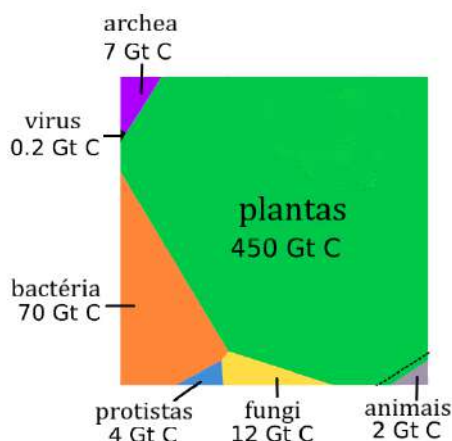


Figura 7: A biomassa da Terra (marinha + terrestre) em bilhões de toneladas de Carbono (Gt C). Adaptada da Ref. [5]. Segundo estes resultados apresentados em figuras com área proporcional a sua ocorrência percentual, as plantas são a maior biomassa da Terra.

A procura por bioassinaturas *in situ* destes organismos já começou em Marte e também há planos ambiciosos para fazê-lo em Encelado e outros corpos [7, 8]. No entanto, o nosso desconhecimento dos extremófilos terrestres é ainda enorme, tal como ilustrado pelo caso do lago Vostok. Antes de concluir apressada e especulativamente pela afirmativa ou negativa no caso daqueles, precisamos estudar a fundo os ambientes extremos na nossa própria Terra. De fato, esta é a forma mais eficiente e econômica de compreender a biologia, ecologia e evolução das criaturas mais extremas das quais temos conhecimento [7, 8].

Sobre o autor

Jorge Ernesto Horvath (foton@iag.usp.br), Professor Titular no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Espaciais (IAG), da Universidade de São Paulo (USP), é Graduado em Física e Doutor em Ciências Exatas pela Universidad Nacional de La Plata (Argentina), e possui Livre Docência pela USP. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na University of Arizona (1998-1999). Fundador e Coeditor da

Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP.

Referências

- [1] R. Seamon, *Genetic 1: classification of life*, Slideshare (2018). Disponível em <https://pt.slideshare.net/seamonr/genetics1-classification-new-85764406>, acesso em maio de 2022.
- [2] A. A. Pulschen et al., *UV-resistant yeasts isolated from a high-altitude volcanic area on the Atacama Desert as eukaryotic models for astrobiology*, *MicrobiologyOpen* **4**(4), 574 (2015).
- [3] F. Diep, *Thousands of species found in Lake Vostok ice*, *Popular Science* (2013). Disponível em <https://www.popsci.com/science/article/2013-07/thousands-species-found-lake-vostok-ice/>, acesso em jun. 2022.
- [4] F. R. T. Altair, M.G.B. de Avellar e D. Galante, *Microbial habitability of Europa sustained by radioactive sources*, *Scientific Reports* **8**, 260 (2018).
- [5] R. P. Y.M. Bar-On e R. Milo, *The biomass distribution on Earth*, *Scientific Reports* **15**(25), 6506 (2018).
- [6] J. R. Havig et al., *Hot spring microbial community elemental composition: Hot spring and soil inputs, and the transition from biocumulus to siliceous sinter*, *Astrobiology* **21**(12), 1526 (2021).
- [7] D. Galante et al. (eds.), *Astrobiologia: Uma ciência emergente* (Tikinet Edição e IAG/USP, São Paulo, 2016). Disponível em <https://www.iag.usp.br/astrobiologia/sites/default/files/astrobiologia.pdf>, acesso em jul. 2022.
- [8] J. A. de Freitas Pacheco, *Vida no Universo* (EDUSP, São Paulo, 2020).

Habitabilidade em luas de sistemas planetários: uma nova fronteira

Eduardo Janot Pacheco e Vitória Bellecerie da Fonseca

Universidade de São Paulo

Resumo

Os voos espaciais realizados nas décadas 80-2000 trouxeram imensos progressos em nossos conhecimentos sobre as condições físicas e químicas existentes nas grandes luas dos planetas gigantes gasosos do Sistema Solar. Sobrevoos próximos sobretudo de Titan, Europa e Enceladus revelaram características surpreendentes sobre essas luas e permitiram compor um quadro bastante detalhado de suas superfícies e interiores e da atmosfera, no caso de Titan. A descoberta de oceanos interiores em praticamente todas as grandes luas de Saturno e Júpiter abriu a extraordinária perspectiva de poder existir vida extremófila nesses locais, algo desconhecido antes. Neste artigo, apresentamos características, sobretudo sobre essas três luas, e argumentos que defendem essa tese: uma nova zona de habitabilidade parece existir nos satélites rochosos de exoplanetas gigantes gasosos, multiplicando a possibilidade de existir vida extremófila através da Via Láctea.

Abstract

Space flights carried out in the 80-2000s brought immense advances in our knowledge of the physical and chemical conditions existing in large moons of the gas giant planets in the Solar System. Close flybys, especially of Titan, Europa and Enceladus revealed surprising features in these moons and made it possible to compose a very detailed picture of their surfaces and interiors and of the atmosphere, in the case of Titan. The discovery of subsurface oceans in almost all the large moons of Saturn and Jupiter opened up the extraordinary prospect that extremophile life could exist in these places, something previously unknown. In this article, we present characteristics, especially about these three moons, and arguments that defend this thesis: a new habitability zone seems to exist in the rocky satellites of gas giant exoplanets, multiplying the possibility of extremophile life across the Milky Way.

Palavras-chave: habitabilidade, sistema solar, condições para a vida.

Keywords: habitability, solar system, conditions for life.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38804](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38804)

1 Introdução

A vida, como a conhecemos na Terra, existe e se desenvolve graças à proteção da atmosfera. Entre outras vantagens, ela impede que radiações nocivas vindas do Sol e da Via Láctea atinjam o planeta e assegura, na superfície, temperaturas adequadas à sua sobrevivência por meio do efeito estufa. Por essa razão, até anos recentes, o foco principal das pesquisas sobre habitabilidade em ambientes extraterrestres se concentrou em exoplanetas e no conceito de Zona Habitável (ZH), a região em torno de uma estrela onde a temperatura na superfície de um planeta com atmosfera permite a existência de água (H₂O) em estado líquido (ver Ref. [1] e suas referências). Essa ZH é também chamada de planetária ou radiativa,

sendo calculada de modo que, em suas bordas interior e exterior, as temperaturas extremas do planeta sejam de 100 °C e 0 °C, respectivamente. Calcular uma ZH é tarefa bastante complexa, pois envolve, entre outros fatores, a presença de uma atmosfera [2].

O conceito de habitabilidade utilizado acima é, na verdade, claramente antropocêntrica, já que supõe que a vida extraterrestre requer meios e condições semelhantes aos dos organismos terrestres como, por exemplo, a presença de H₂O como solvente para assegurar as reações químicas entre moléculas orgânicas. Os reais limites para a vida cósmica são desconhecidos, mas a hipótese de condições similares às da Terra, apesar de limitada, é um início razoável para um estudo sobre habitabilidade já que, até que se possua



Figura 1: Registro de Io pela sonda Galileo, mostrando grandes erupções vulcânicas. Fonte: NASA/JPL/University of Arizona.

dados detalhados sobre outros planetas habitados, as discussões sobre vida extraterrestre são necessariamente enviesadas, por serem baseadas em nossa experiência terrestre. Acredita-se hoje que, num passado remoto da Terra, substâncias pré-bióticas reagiram espontaneamente em meio aquoso para sintetizar moléculas mais complexas, chegando finalmente ao RNA e DNA, componentes celulares indispensáveis para todo tipo de vida conhecida (ver, por exemplo, Ref. [3]).

Planetas massivos, inclusive os gigantes gasosos, tendem a ter mais satélites, em decorrência do processo de formação por acreção, e isso deve ter sucedido igualmente com exoplanetas, fora do Sistema Solar. Em um sistema dinâmico de N-corpos, ocorrem interações gravitacionais que podem produzir órbitas com ressonâncias. Objetos ressonantes estão sujeitos a um padrão de movimentação específico ao redor do corpo principal, neste caso um planeta, e a marés gravitacionais que variam de maneira periódica, com a consequente geração de energia na forma de calor. Io, o menor dos satélites galileanos do Júpiter, tem seu interior fortemente aquecido, e isso se manifesta na forma dos maiores e mais intensos vulcões do Sistema Solar, com ejeções de matéria até quase 200 km de altura, como mostra a Figura 1.

A partir do final do século XX, observações do solo com grandes telescópios e do telescópio espacial Hubble (1990-) permitiram uma nova fronteira no estudo de objetos do Sistema Solar. Mais ainda, sondas espaciais enviadas para os planetas



Figura 2: Quantidade de água em relação ao volume total e à massa dos oceanos terrestres de corpos oceânicos do Sistema Solar. Créditos: PHL/UPR Arcibo, NASA; via [Our Planet – pale blue dot](#), traduzida pelos autores.

mais distantes possibilitaram a procura por condições de habitabilidade fora da Terra. Podem ser citadas as missões Pioneer 10 (1973), Pioneer 11 (1974) e Voyager 1 e Voyager 2, de 1979, que cruzaram o sistema de Júpiter, trazendo pela primeira vez maiores detalhes sobre seus satélites por meio de *flybys*, isto é, voos muito próximos. Em particular, com a sonda Galileo (1989-2003), da agência espacial estadunidense NASA, foi feito um estudo mais detalhado acerca da atividade vulcânica de Io, a possibilidade de Europa conter água em estado líquido, a superfície com muitas crateras de Calisto e o campo magnético de Ganimedes. Atualmente, a sonda Juno (NASA, 2011-) está explorando o planeta gigante. Já para o sistema de Saturno, a missão Cassini-Huygens (1997-2017), parceria entre as agências italiana ASI, europeia ESA e a NASA, foi essencial para a descoberta e observação de diversas luas, bem como os anéis do planeta. O *lander* Huygens inclusive pousou na lua Titan em 2005, investigando sua atmosfera e composição superficial.

Assim, diversas luas, nas quais confirmou-se a presença de oceanos salgados abaixo de suas superfícies geladas, foram classificadas como “Mundos Oceânicos”, como mostra a Figura 2, com o volume e porcentagem em massa de água líquida em cada corpo, em comparação à Terra. De fato, existe tal estrutura nos satélites de Júpiter (e.g., Europa, Ganimedes e Calisto) e de Saturno (Titan e Enceladus, por exemplo) [4]. Na Tabela 1, mostramos uma comparação entre parâmetros físicos (raio equatorial, massa, densidade média e gravidade superficial) de Europa, Titan, Enceladus e Lua.

Titan possui até mesmo grandes lagos, prova-

Tabela 1: Parâmetros físicos e de massa dos satélites analisados neste artigo: Europa, Titan e Enceladus, e da Lua.

Parâmetro	Europa	Titan	Enceladus	Lua
Raio equatorial	1560,8 km	2575,0 km	252,1 km	1738,1 km
Massa	$4,80 \cdot 10^{22}$ kg	$1,34 \cdot 10^{23}$ kg	$1,08 \cdot 10^{20}$ kg	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg
Densidade média	3010 kg/m ³	1881 kg/m ³	1610 kg/m ³	3344 kg/m ³
Gravidade superficial	1,310 m/s ²	1,35 m/s ²	0,113 m/s ²	1,620 m/s ²
Referências	[5, 6]	[5, 7]	[7, 8]	[9]

velmente compostos por etano (C₂H₆) e metano (CH₄). Tanto este satélite como Enceladus possuem grandes reservatórios de líquido em seus interiores, aquecidos por marés gravitacionais, compostos orgânicos e atividade geológica [10]. Por sua vez, os dados mais precisos de Europa até o momento foram obtidos pela Galileo, que encontrou semelhanças nessa lua com a Groenlândia, ainda que um defeito em uma das antenas tenha prejudicado a qualidade das imagens produzidas.

Garcia-Lopez & Cid mostraram que o interior destas luas geladas são ambientes semelhantes aos glaciares terrestres e ao continente antártico, e são os locais mais favoráveis para a vida no Sistema Solar [11]. Em particular, supõe-se que, tanto em Enceladus como em Europa, o oceano está em contato com o fundo sólido dos corpos, de modo que pode haver a formação de fontes hidrotermais, isto é, as chaminés oceânicas existentes no fundo do mar na Terra e que abrigam uma fauna exuberante de vida microbiana e também multicelular.

Podemos dizer então que, nos sistemas planetários de planetas gigantes, pode existir também uma Zona Habitável, circumplanetária e ocupada por satélites. As luas Europa, Titan e Enceladus serão abordadas em mais detalhe neste artigo sobre suas condições de habitabilidade.

2 Os extremófilos terrestres

Os extremófilos terrestres são microorganismos, bactérias e arqueas, capazes de viver em ambientes com condições extremas, seja de temperatura (acima de 100 °C ou abaixo de 0 °C), pH (abaixo de 1 ou acima de 10, muito ácido ou muito alcalino, respectivamente), em condições de salinidade quase saturada ou de pressão (acima de 100 MPa) [12]. Essas são condições extremamente distantes da zona de

conforto de organismos mesofílicos como nós e boa parte dos seres multicelulares com os quais convivemos. Os extremófilos ocupam praticamente todos os ambientes terrestres e participam de importantes ciclos biogeoquímicos, de modo que há indicadores de que a vida não é algo frágil como se considerada até há pouco [13], mas é um fenômeno robusto e prolífico, dadas algumas condições mínimas do ambiente.

A constatação de que os organismos extremófilos podem viver numa larga gama de condições físicas e químicas os tornam candidatos naturais a habitarem ambientes extraterrestres inóspitos para o ser humano, como os oceanos interiores das luas dos planetas gigantes. Acredita-se que existem, pelo menos em Enceladus e Europa, fontes hidrotermais no fundo oceânico semelhantes às existentes em nosso planeta (Figura 3), em torno das quais seres resistentes a altas pressões e temperaturas foram encontrados [14].

Nas regiões de atividade vulcânica por fontes hidrotermais, a água do mar infiltra no manto terrestre através de rachaduras e rochas porosas, sendo aquecida pelo magma. Assim, ocorrem reações químicas, como a serpentinização, aquecendo o ambiente ao redor para até 400 °C. Gases metano (CH₄) e hidrogênio molecular (H₂) são liberados na água, fontes de energia que podem ser utilizadas por organismos quimiossintéticos. Tais ecossistemas de serpentinização são importantes análogos para ecossistemas supostos para Terra e Marte primitivos [15].

Há precipitação de minerais, formando torres de estruturas similar a chaminés. Na Figura 3, um ambiente de cerca de 90 °C e pH alcalino na faixa 9-11, dominado, por exemplo, pelo grupo de arqueas da ordem *Methanosarcinales* [16, 17].

A área ao redor das fontes hidrotermais constitui um cenário para uma “teia” alimentar única, mantida por microorganismos que obtêm energia da oxidação do enxofre e outros compostos, pro-

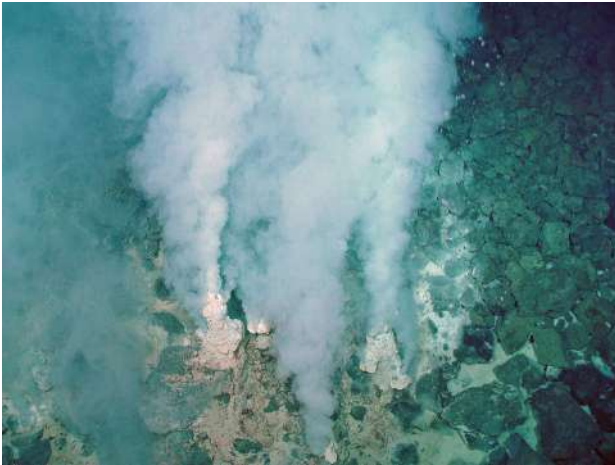


Figura 3: Chaminé branca no anel de fogo submarino no Arco das Marianas, Oceano Pacífico. Créditos: NOAA Office of Ocean Exploration.



Figura 4: Fauna das fontes hidrotermais, com crustáceos e moluscos. NOAA Office of Ocean Exploration.

duzindo substâncias orgânicas. Tal ecossistema suporta uma rica fauna, incluindo seres multicelulares como crustáceos, polvos, moluscos e minhocas (Figura 4).

Uma exemplar de sobrevivência ao extremo é a arquea metanogênica, o único micro-organismo conhecido a produzir metano na ausência de oxigênio [18]. A Figura 5 mostra a fotografia eletrônica da espécie *Methanothermococcus okinawensis*, isolada de uma fonte hidrotermal do oceano profundo. Os experimentos envolvendo este ser são melhor detalhados na Seção 5.

A equação da metanogênese, envolvendo a produção de gás metano (CH_4) e água (H_2O) a partir de hidrogênio molecular (H_2) e gás carbônico (CO_2), é a seguinte,

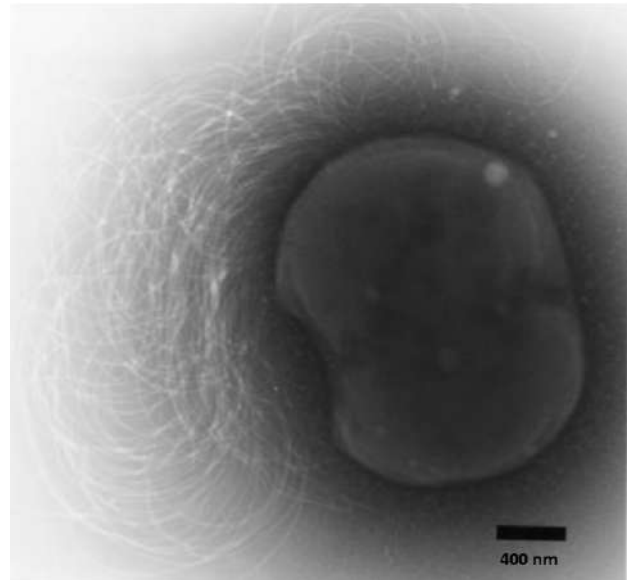


Figura 5: Micrografia eletrônica de células da arquea metanogênica *Methanothermococcus okinawensis*. Fonte: Ref. [19].

Vale citar ainda, que a bactéria *Deinococcus radiodurans* (Figura 6) tolera altos índices de radiação ultravioleta e baixas temperaturas, sendo um extremófilo bastante analisado.

A análise de ambientes terrestres análogos às luas é de extrema importância já que, a partir deles, são criados modelos de habitabilidade das mesmas utilizando dados obtidos pelas sondas. Ainda, podem ser utilizados para desenvolvimento e teste de missões futuras para detectar vida.

3 Europa: a mítica lua de Júpiter

Os satélites galileanos, Io, Europa, Ganimedes e Calisto, originaram-se a partir do material remanescente da formação de Júpiter pela nuvem de gás e poeira ao redor do proto-Sol. São considerados um “mini Sistema Solar” visto que, assim como ocorreu a diferenciação química e estrutural entre planetas interiores rochosos e exteriores gasosos, os satélites mais próximos ao planeta principal são mais densos, compostos por materiais mais rochosos e metálicos.

Há ressonância nos períodos orbitais entre Ganimedes, Europa e Io de 1:2:4, produzindo efeitos de maré gravitacional sobre as luas, que se adicionam à influência de Júpiter [20].

Europa é, especificamente, a melhor candidata à habitabilidade entre os satélites galileanos, por



Figura 6: *Deinococcus radiodurans*, uma espécie de bactéria altamente resistente à radiação UV e a baixas temperaturas, como exemplo de organismo terrestre extremófilo. Créditos: [ESRF](#).

possuir uma combinação de atributos importantes: oceano interior, superfície com atividade geológica e estar em ressonância orbital, na qual é produzida energia que a aquece internamente.

O diâmetro da mesma, próximo a 3000 km (Tabela 1), pode ser associado à distância entre as cidades de São Paulo (SP) e Oiapoque (AP), cidade mais setentrional do Brasil, como mostra a Figura 7b.

Na mitologia grega, Europa foi uma mortal raptada pelo deus Zeus, correspondente a Júpiter na cultura romana, concedendo seu nome tanto para o continente como para o satélite [21]. Além disso, as linhas na superfície do satélite são nomeadas com referência aos contos da Odisseia, de Homero, como Rhadamanthys e Agenor, e demais acidentes são denotados em função de mitos, heróis e localidades celtas, tais como Pwyll e Conamara, a título de exemplo [22].

O núcleo rochoso é possivelmente rico em ferro (Fe), está em contato com um oceano de cerca de 100 km de profundidade abaixo de uma camada de gelo de espessura 3-30 km (recorte transversal na Figura 8). Supõe-se que o oceano e a crosta de gelo sejam compostos majoritariamente por H_2O , seguida de sulfato de magnésio ($MgSO_4$) e sulfato de sódio (Na_2SO_4). Também são importantes o cloreto de sódio ($NaCl$), CO_2 e íons de cálcio (Ca^{2+}) e bicarbonato (HCO_3^-) [23, 24].

Como visto na Figura 7a, o satélite é atravessado

por fraturas longas e lineares, rachaduras e terrenos de caos, geradas por atividade tectônica e de estresse por marés. A coloração marrom-avermelhada vista em algumas regiões é possivelmente relacionada à deposição de substâncias com íons de enxofre (S) e magnésio (Mg) originadas nos grandes vulcões de Io. Novas análises indicam a existência de gás oxigênio (O_2) formado por radiólise, a partir da interação de materiais na superfície com partículas energéticas da magnetosfera de Júpiter [25, 26].

Os vulcões terrestres expõem, por excesso de pressão interior, lava - rocha quente fundida. Ao invés disso, a atividade criovulcânica ejeta vapor, gases congelados e partículas de gelo. No caso de Europa e Enceladus, as “plumas” liberadas são como jatos de gêiser. Sua composição pode estar associada às fontes hidrotermais no fundo oceânico, que produzem ondas de convecção de calor.

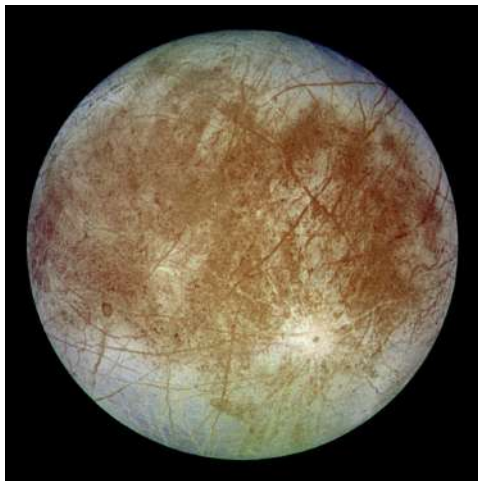
A existência da ejeção de material em Europa foi constatada com o telescópio espacial Hubble e por uma nova análise de imagens da Galileo. Em comparação às plumas de Enceladus, o fenômeno em Europa é de visualização mais difícil até para sondas espaciais, já que aparenta ser de menor intensidade e até esporádico, possivelmente devido à maior gravidade superficial da lua (Tabela 1).

O transporte de material interno até a superfície pode ocorrer então através de fissuras na crosta de gelo, encontradas por exemplo nos terrenos caóticos. Na Figura 9 mostra-se a região de Conamara, na qual houve movimentação de material por sucessivos derretimentos e congelamentos. Da mesma forma, estima-se que pode haver condução de substâncias da superfície, como O_2 , para o interior de Europa [25]. Tais reservatórios de líquido podem ser pensados como candidatos para abrigar alguma forma de vida com a capacidade de permanecer em estado de latência entre períodos de derretimento do gelo [23].

A atividade geológica em andamento em Europa, resulta na formação de uma superfície jovem, formada há 1,5-30 milhões de anos, o que também é coerente com a pequena quantidade de grandes crateras de impacto, já que os terrenos estão em constante renovação [26].

4 Titan: a grande lua de Saturno

Titan é a maior lua de Saturno e a segunda maior do Sistema Solar, após Ganimedes, sendo



(a) Superfície de Europa. Créditos: NASA/JPL-Caltech/SETI.



(b) Distância entre as cidades de São Paulo e Oiapoque em comparação ao diâmetro de Europa. Créditos: Adaptado de Google Maps, 2022.

Figura 7: Superfície e escala de tamanho de Europa.

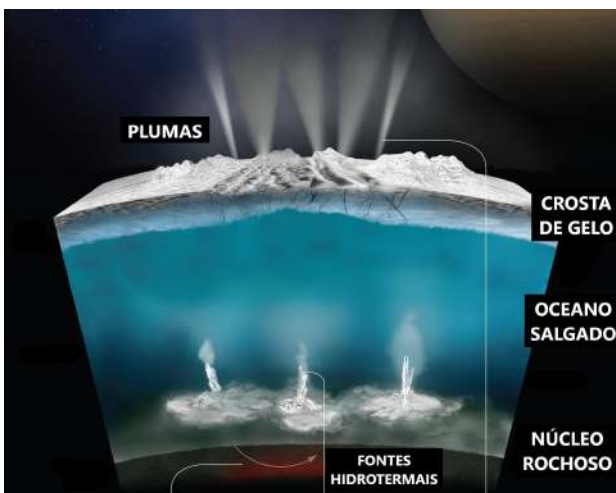


Figura 8: Ilustração do corte transversal para uma lua oceânica, como Europa e Enceladus. Créditos: Adaptada e traduzida de NASA/JPL-Caltech/Southwest Research Institute.



Figura 9: Região de caos de Conamara, hemisfério traseiro de Europa, com blocos de gelo que sofreram derretimento e posterior congelamento. Créditos: Science@NASA and NASA’s Goddard Space Flight Center.

maior do que o planeta Mercúrio e tendo o dobro do tamanho da Lua. Em uma escala de tamanho mais habitual, seu diâmetro de cerca de 5000 km (Tabela 1) corresponde à distância no globo entre as cidades de São Paulo e São Domingo (República Dominicana).

Seu nome vem da mitologia grega: os Titans eram os deuses supremos iniciais da mitologia grega, filhos do Céu (Uranos) e da Terra (Gaia). O mais importante foi Cronos (Saturno, em latim) e os nomes dos Titans foram dados aos principais satélites naturais de tal planeta. Ao maior deles foi dado simplesmente o nome de “Titan”.

Esta lua constitui um caso muito interessante para a astrobiologia, já que possui um oceano subterrâneo, uma atmosfera densa, muita matéria orgânica e lagos. Além disso, tem uma atividade geológica intensa, com ventos, erosão, chuva e depósito de sedimentos e, provavelmente, tectonismo e crio-vulcanismo [27]. Essas características foram certamente importantes para o surgimento e manutenção da vida na Terra. Como no caso de Europa e Enceladus, algum tipo de vida pode ter se desenvolvido no oceano interior de Titan.

A sonda Cassini-Huygens, vista na Figura 10, foi lançada em outubro de 1997, viajou por cerca de 7 anos e explorou o sistema de Saturno até 2017, quando mergulhou propositalmente na densa atmosfera do planeta. A Huygens se des-



Figura 10: Ilustração da sonda Cassini com o *lander* Huygens acoplado, e seus instrumentos científicos. Créditos: NASA Johnson Space Center, tradução dos autores.

tacou em dezembro de 2005 e foi lançada sobre Titan, para estudar sua atmosfera e seu solo. Permaneceu funcionando durante cerca de 70 minutos após a “atitanissagem” (até suas baterias acabarem), tendo detectado um solo rico em compostos orgânicos, como metano (CH_4), etano (C_2H_6), cianogênio (C_2N_2), benzeno (C_6H_6), entre outros, típico de uma química complexa (Figura 11). Huygens foi o único instrumento construído pelo ser humano a pousar em um corpo nas profundezas do Sistema Solar.

Como a Terra e os vizinhos Vênus e Marte, Titan possui uma atmosfera que isola e protege confortavelmente sua superfície do hostil espaço exterior, favorecendo o aparecimento e a manutenção eventual de vida. Existem apenas dois corpos no Sistema Solar nos quais um ser humano pode sobreviver sem uma indumentária pressurizada e onde existem reservatórios perenes de líquidos: Terra e Titan. Contudo, os ares de Titan são muito diferentes dos nossos: são compostos quase que inteiramente de nitrogênio molecular (N_2 , 95%, contra 78% na Terra) e de CH_4 (5%, contra apenas 0,00017% na Terra), e a pressão atmosférica na superfície é de cerca de 1,5 vezes a terrestre. Além disso, a físico-química e a forte abundância de carbono - capaz de formar grandes moléculas - leva a reações químicas que produzem hidrocarbonetos como o C_2H_6 . Tais moléculas orgânicas e seus derivados compõem a chuva em Titan, em que a temperatura média na superfície é de 94 K (cerca de -179°C). Na Terra, as nuvens de H_2O alimentam lagos e rios, e em Titan eles são formados essencialmente por C_2H_6 e CH_4



Figura 11: Imagem da Huygens da superfície de Titan. Créditos: ESA.

líquidos, que têm seus pontos de congelamento a 88 K e 84 K, respectivamente [28].

A atmosfera de Titan (Figura 12) é bombardeada na parte superior por fótons e pelo vento solar (elétrons e prótons), que, apesar da distância do Sol, causa efeitos significativos. Também atingida por partículas carregadas que são capturadas pela magnetosfera de Saturno. Como na Terra, existe nessa lua um efeito estufa, causado sobretudo por CH_4 , aquecendo a superfície e a atmosfera, e fornecendo energia para que as reações químicas entre moléculas orgânicas complexas ocorram. São essas reações que explicam a densidade e o aspecto de névoa (“haze”) da atmosfera. A Figura 14b mostra a superfície no infravermelho, abaixo da nebulosidade.

A sonda Cassini levava uma dúzia de instrumentos das mais variadas especialidades, que analisaram os múltiplos aspectos de Titan através de 127 *flybys*. Foi graças a esses sobrevoos que foram descobertos na superfície vários acidentes, como rios e enormes lagos próximos ao polo norte da lua (comparáveis em tamanho aos chamados “Grandes Lagos” na fronteira entre os Estados Unidos e o Canadá), como por exemplo o Ligea Mare, na Figura 13. Ainda, há crateras, dunas, montanhas (e a presença de ventos e erosão), e possivelmente vulcões que parecem expelir lava gelada e grandes planícies escuras cobertas de gelo de água na re-

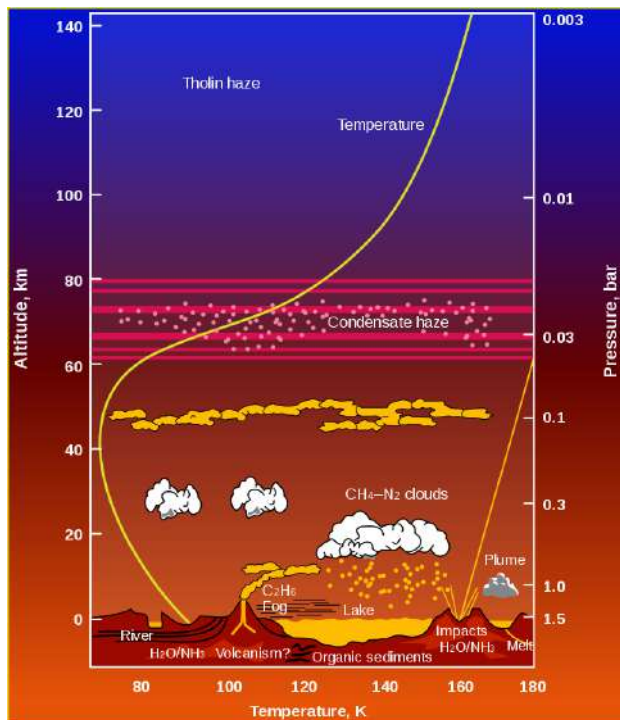


Figura 12: Gráfico detalhado de temperatura, pressão, altitude e compostos químicos relacionados à atmosfera de Titan. A névoa (*haze*) diminui a temperatura na baixa atmosfera, enquanto CH_4 aumenta a temperatura na superfície. Há precipitação e formação de lagos de maneira similar ao ciclo hidrológico na Terra, mas com compostos orgânicos como C_2H_6 e CH_4 . Créditos: NASA/JPL-Caltech, via [Wikipedia](#).

gião equatorial, entre outros. Um oceano interior com profundidade entre 50 e 200 km também foi detectado via radar.

O radar da Cassini, entre outros instrumentos, permitiu que se fizesse um modelo da estrutura interna de Titan (Figura 14a). O interior contém água líquida porque, à semelhança do que ocorre em Europa e Enceladus, há aquecimento por forças de maré gravitacional, de modo que são alcançadas temperaturas bem superiores à da superfície.

A atmosfera de Titan é semelhante à da Terra no período Arqueano (4-2,5 bilhões de anos atrás). Sua composição química, bem como a do solo, é dominada por N_2 , o que faz com que moléculas orgânicas nitrogenadas sejam abundantes. Isso, aliado a uma temperatura da ordem de -180°C , leva obviamente a que a química dominante na lua seja muito diferente da nossa, em que o solvente no qual as moléculas pré-bióticas podem reagir é a água e a presença do nitrogênio é bem mais baixa. Provavelmente, se a vida se desenvolveu em Titan, ela deve ter produzido re-

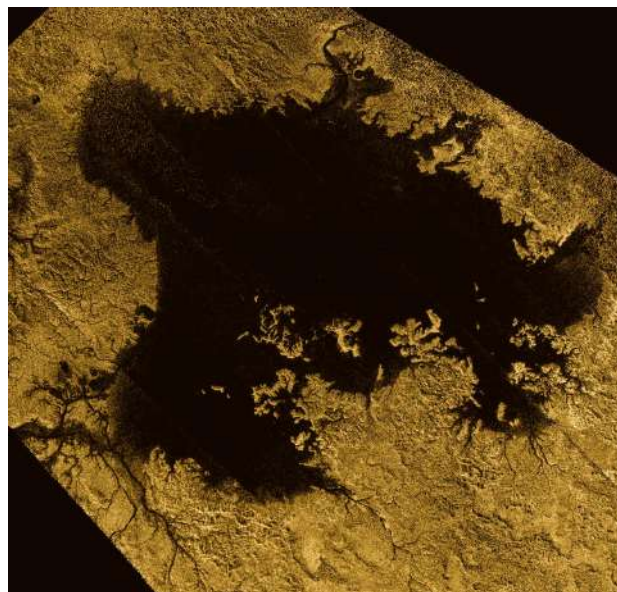
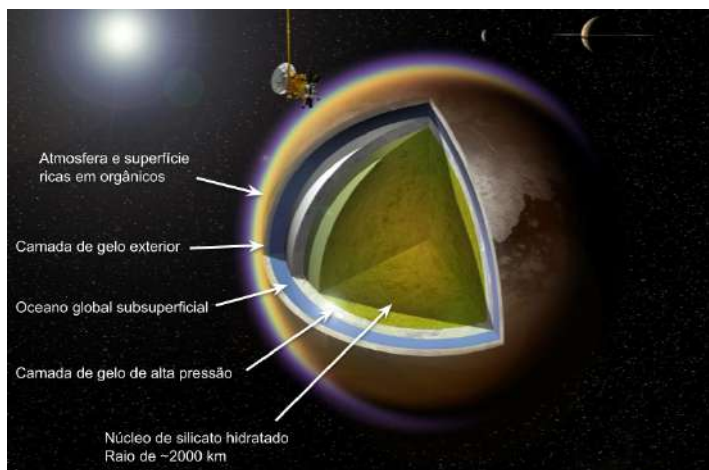


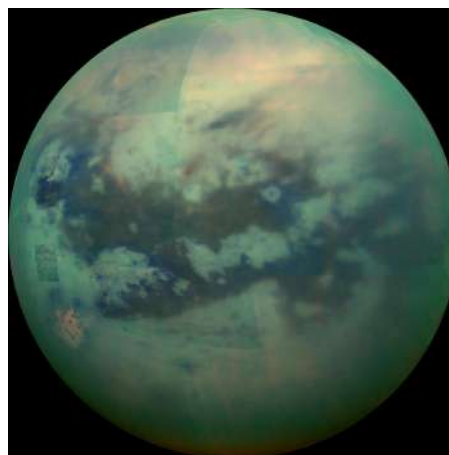
Figura 13: Ligea Mare em cores falsas obtido pelo radar da Cassini. Créditos: [NASA/JPL-Caltech/ASI/Cornell](#).

sultados bastante diferentes do que conhecemos.

As células dos seres vivos primitivos, como bactérias e arqueas, e aliás, como qualquer célula de nosso corpo humano, necessitam de uma cavidade ou vesícula, que contenham seus componentes e os protejam do meio ambiente. Acredita-se que essas vesículas surgiram muito cedo na história da vida na Terra, provavelmente de forma concomitante. Em nosso planeta, os envoltórios ou membranas celulares (chamadas de fosfolipídios) são formadas de uma “cabeça”, contendo um átomo de fósforo ligado a vários de oxigênio, que tem polaridade elétrica negativa, e duas “caudas” formada por 15-20 átomos de carbono cercados de átomos de nitrogênio. As caudas são eletricamente neutras, enquanto a cabeça tem uma distribuição de cargas assimétricas, e é chamada de “polar” do ponto de vista elétrico. Quando essa estrutura é dissolvida em água, que é também uma molécula polar (os elétrons da água são mais fortemente atraídos para seu oxigênio do que para os átomos de hidrogênio). Isso faz com que o lado da molécula onde há hidrogênio seja ligeiramente mais positivo do que o de oxigênio. Essa característica polar da molécula da água faz com que ela atraia a cabeça polar do fosfolipídio que é, portanto, hidrófila (que gosta de água), e repele a cauda não-polar, que é hidrofóbica. Essas duas ações conjugadas fazem com que, quando fosfolipídios são dissolvidos em água, as propriedades elétricas das duas moléculas agindo juntas levam



(a) Modelo da estrutura interna de Titan, baseado em resultados obtidos sobretudo com o radar da Cassini. Ele contém um núcleo de rochas embebidas em água e camadas de gelo próximas à superfície. Entre essas camadas, existe um oceano de água líquida. Créditos: A. D. Fortes/UCL/STFC, tradução dos autores.



(b) Titan no infravermelho, sendo possível observar abaixo da camada de névoa de sua atmosfera. Créditos: NASA/JPL/University of Arizona/University of Idaho.

Figura 14: Esquema de seção transversal e fotografia de Titan.

os fosfolipídios a se organizarem na forma de uma membrana, suas cabeças de um lado e suas caudas do outro. Um conjunto de fosfolipídios tende a se agrupar, formando uma membrana. Na vida terrestre, o padrão encontrado é de cápsulas formadas por duas membranas de material lipídico.

E como seria em Titan, na ausência de água líquida e com pouquíssimo oxigênio? A partir das abundâncias químicas encontradas na atmosfera da lua, Stevenson et al. sugeriram que, em Titan, membranas tenham sido formadas por grupos de moléculas contendo um par CN, moléculas denominadas nitrilas ou cianetos, em substituição às membranas lipídicas terrestres [29]. A partir de análises teóricas e experimentos de laboratório envolvendo ambientes com forte concentração de nitrogênio dissolvidos em CH_4 líquido e em temperaturas semelhantes às da superfície de Titan, no mesmo estudo foi mostrado que algumas nitrilas, como a acrilonitrila, são capazes de formar membranas e vesículas estáveis e com propriedades semelhantes às das terrestres. Uma das autoras é francesa, e eles deram à membrana ou vesícula o nome de “azotosome” (em francês, o nitrogênio é chamado de “azote”). A viabilidade de existirem membranas celulares em Titan abre a possibilidade da existência de vida por lá, mas bem distinta da que conhecemos na Terra.

Recentemente, outro grupo de pesquisadores, liderado por um brasileiro da Unicamp, fez um modelo da formação de uma grande cratera de

impacto (isto é, causada pela queda de um meteorito) em Titan chamada “Menrva”, que tem cerca de 430 km de diâmetro [27]. Seus resultados sugerem que a energia cinética do meteorito transferida para o solo causou um aumento de temperatura até cerca de 280 K (7°C), provocando o surgimento no local de um micro-ecossistema habitável durante horas. Além disso, a camada de gelo superficial se fundiu e água do oceano subterrâneo se misturou ao material aquecido da superfície. Essa água poderia já conter alguma forma primitiva de vida. De modo contrário a processos geológicos, como vulcanismo e tectônica de placas, o impacto de corpos celestes é ubíquo em todo o Universo, e independe das condições físicas e dinâmicas do sistema. Estes episódios possuem potencial de destruição de ambientes, representando uma barreira para emergência e manutenção da vida, mas também podem ocasionar ambientes propícios ao desenvolvimento de seres vivos, como lagos, fontes termais e locais onde há sedimentação de material [30]. Ainda, a colisão de objetos pode representar a entrada de componentes químicos importantes, em especial compostos orgânicos e voláteis. As crateras remanescentes de impacto são, então, novos locais potenciais onde a vida poderia se desenvolver nas luas do Sistema Solar.

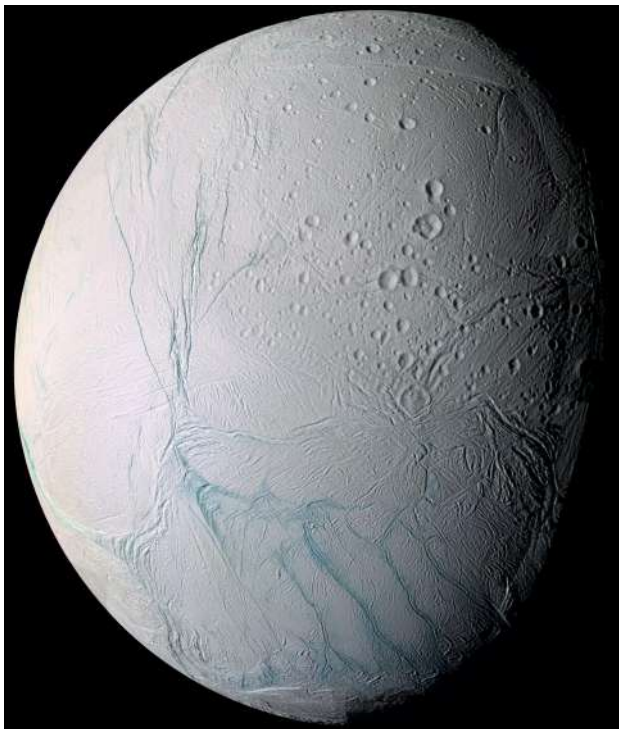


Figura 15: Superfície de Enceladus. Créditos: NASA/JPL/SSI.

5 Enceladus: a lua ativa de Saturno

Enceladus (Figura 15) recebeu seu nome do gigante da mitologia grega, filho de Gaia e Uranus [5, 21]. Seu diâmetro de cerca de 500 km (Tabela 1) pode ser comparado à distância, em linha reta, entre as cidades de São Paulo (SP) e Belo Horizonte (MG).

Possui uma estrutura interna similar à de Europa (Figura 8), com um núcleo rochoso e poroso, um oceano global e uma camada de gelo. O criovulcanismo ocorre apenas no polo Sul, com plumas sendo liberadas de quatro fissuras nomeadas *tiger stripes* (listras de tigre). As mesmas foram nomeadas em referência a cidades mencionadas no conto popular do Oriente Médio “As Mil e Uma Noites”: Alexandria, Cairo, Bagdad e Damascus (Figura 16). Seu nome é seguido pelo termo *sulcus* (plural *sulci*), do latim.

Como resultado do travamento de maré com Saturno, Enceladus tem um período de rotação síncrono em relação ao planeta principal, mantendo sempre a mesma face voltada para este. Provavelmente a principal origem da atividade da lua vem da dissipação de energia por marés [31]. Além disso, a ressonância orbital de 2:1 com o satélite Dione [32] e o decaimento radiativo de componentes do núcleo também podem



Figura 16: *Tiger stripes* na superfície de Enceladus. São mostrados os *sulci* Alexandria, Cairo, Bagdad e Damascus, bem como o Polo Sul. Créditos: NASA/JPL/SSI/CICLOPS.



Figura 17: Variação das plumas de Enceladus em 2017: 18 de Junho, 02 de Agosto e 28 de Agosto, Observadas pela Cassini. Fonte: Ref. [34].

contribuir para o fenômeno [17, 33].

É possível notar ainda a relação direta entre a atividade das plumas, a posição de Enceladus em sua órbita e a variação da excentricidade orbital, consequência da interação de N-corpos. Como resultado, é observado um fenômeno de grande variabilidade na Figura 17, com intervalo de apenas alguns dias entre as fotografias.

Através dos *flybys* da Cassini, o espectrômetro de massa e o coletor de poeira cósmica identificaram que a composição das plumas é primariamente água - mais de 90% de H_2O . Além disso, CO_2 , amônia (NH_3), CH_4 , H_2 , sulfato de hidrogênio (H_2S), metanol (CH_3OH), cianeto de hidrogênio (HCN) e outros compostos orgânicos leves estão presentes. Também há sais, como $NaCl$, carbonato de sódio (Na_2CO_3), bicarbonato de sódio ($NaHCO_3$) e cloreto de potássio (KCl) [17, 18]. O pH do oceano é estimado entre 11 e 12.

Partículas nanométricas de sílica (SiO_2) foram capturadas na magnetosfera de Saturno, e sua ori-

gem mais provável é a atividade hidrotermal no fundo oceânico de Enceladus. Além disso, o fluxo expelido de grãos desse tamanho escapa da gravidade do satélite, é capturado pelos campos elétrico e magnético do planeta principal e fornece inclusive material para a constituição do anel E, o de maior distância ao planeta. Todavia, grãos de tamanho micrométrico caem na superfície do satélite, como neve [17, 35].

Para enfatizar a potência das plumas, foi demonstrado por observações da *Cassini* e do observatório espacial *Herschel*, operado pela ESA, que Enceladus é a origem principal da água presente na estratosfera de Saturno, de distribuição mais intensa no equador do mesmo [36].

De acordo com JPL-NASA, estima-se que a energia térmica total gerada no satélite seja de 15,8 gigawatts (GW) [37]. Em comparação, a potência gerada na Usina Hidrelétrica de Itaipu, entre o Brasil e o Paraguai, é de 14 GW, inferior à produção energética em Enceladus [38]. Já para Europa, estima-se que a taxa de aquecimento produzida no interior é cerca de 1.600 GW [22].

Em Taubner et al. foi analisada a produção de CH_4 biológico em condições físico-químicas extrapoladas a Enceladus [18]. É indicado que a possível fonte mais relevante de H_2 seja a serpentinização do mineral olivina no núcleo da lua. Resultados computacionais cinéticos e termodinâmicos indicam que deve haver produção suficiente deste composto para ser utilizada por microorganismos como substrato na metanogênese, detalhada na equação (1).

Os experimentos realizados em laboratório reproduziram um sistema de pH alcalino, com temperaturas de 0°C a $> 90^\circ\text{C}$ e pressões de até 50 bar (5 MPa), constituído por cloreto de amônia (NH_4Cl), formaldeído (CH_2O) e metanol (CH_3OH). Demonstrou-se que a arquea metanogênica *Methanothermococcus okinawensis* cresceu de maneira estável e reprodutível em diferentes misturas de gases e sem fases estendidas de latência e continuou realizando metanogênese. Taubner et al. também argumentam que é aceitável estimar que parte do CH_4 detectado nas plumas de Enceladus seja produzido por atividades biológicas [18].

As condições físicas e químicas em certas regiões de Europa são semelhantes às da lua de Saturno, e pode-se portanto especular que arqueas extremófilas seriam também capazes de sobrevi-

ver na mesma.

6 Conclusões e perspectivas: futuras missões

Imensos progressos foram feitos nos conhecimentos do ser humano sobre as grandes luas dos gigantes gasosos do Sistema Solar, graças sobretudo às missões espaciais das últimas décadas. Aprendemos com elas que existe uma nova fronteira para a habitabilidade, pois os oceanos interiores, comuns nessas luas, ou superficiais (existentes em Titan) apresentam condições físico-químicas que permitem a extremófilos terrestres viverem nesses ambientes.

Para além de registrar as descobertas já feitas com as sondas espaciais, sobretudo a Galileo e a Cassini-Huygens, é relevante citar aqui as missões em fase de planejamento que auxiliarão a compreender melhor os “mundos oceânicos” num futuro próximo.

O projeto JUICE (Jupiter ICy moons Explorer), da agência espacial europeia ESA, tem lançamento planejado para 2023 e chegará ao sistema de Júpiter em 2029. Irá mapear emissões e interações dos vulcões de Io para Europa, bem como obterá detalhes sobre a possibilidade da existência de oceanos subsuperficiais também em Calisto e Ganimedes, terminando por se colocar em órbita ao redor do último em 2032, que é a única lua a possuir um campo magnético próprio.

Já a Europa Clipper, a ser lançada pela NASA em 2024, fará diversos *flybys* nos satélites galileanos. Em particular, um magnetômetro analisará como o oceano de Europa interage com o campo magnético de Júpiter e medirá sua profundidade e salinidade, um parâmetro importante para a análise da potencial habitabilidade da lua. Além disso, há um coletor de poeira para ser aplicado junto a um espectrômetro de massa, seguindo experiências do recolhimento de material das plumas de Enceladus pela Cassini [39].

Para o sistema de Saturno, está programada para 2027 a missão *Dragonfly*, composta de um helicóptero e *lander* enviado para a superfície de Titan, que inclui um equipamento para acompanhamento de sismos e condições meteorológicas.

Ainda pode ser citado o telescópio espacial *James Webb* (JWST), que foi lançado em 2021, poderá ser utilizado para imageamento e espectroscopia, sobretudo da atividade geológica de Eu-

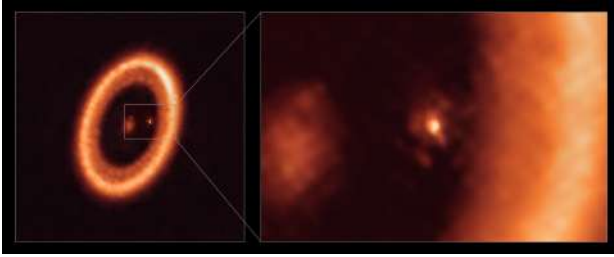


Figura 18: À esquerda, sistema estelar PDS 70. À direita o planeta PDS 70c, do tipo Júpiter, no qual há um disco circumplanetário e a provável formação de exoluas. Fonte: Ref. [40].

ropa, além das contribuições já efetuadas pelo *Hubble*.

Em 2021, através do observatório ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) no Chile, detectou-se pela primeira vez a presença de um disco circumplanetário fora do Sistema Solar [40], visto na Figura 18. Tal fenômeno ocorre no sistema da estrela PDS 70, cerca de 400 anos-luz de distância da Terra, com dois planetas confirmados: PDS 70c e PDS 70b. O primeiro é um planeta do tipo Júpiter, de dimensões próximas ao gigante gasoso, com um disco de tamanho comparável à distância Sol-Terra e de massa suficiente para formar até três satélites do tamanho da Lua.

Além disso, em uma análise recente de observações de trânsito planetário com o telescópio espacial Kepler, foi aparentemente identificada uma exolua orbitando um planeta também do tamanho de Júpiter. Um estudo mais detalhado ainda é necessário para validar ou rejeitar a candidata Kepler-1708 b-i [41]. Trata-se de uma detecção difícil, mas espera-se que futuros satélites com novas técnicas possam melhorar esse cenário. Um exemplo próximo é o o PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars, da agência espacial europeia ESA, e do qual o Brasil participa, com astrofísica e engenharia. Será lançado em 2026, e suas modernas técnicas fotométricas permitirão, através de um tratamento de dados apropriado, melhorar bastante a possibilidade de detecção de luas de exoplanetas gasosos.

Em resumo, a abertura dessa nova perspectiva, da possibilidade de organismos diferentes de nós, *eucariotos* terrestres, poderem existir em luas de gigantes gasosos fora da Zona Habitável circunestelar, ocorre também em satélites de exoplanetas, ampliando assim, essa nova fronteira de habitabilidade através de toda a Via Láctea.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fomento nos editais de iniciação científica PIBIC 2020-2678 e 2021-2114, referentes aos projetos *Exoplanetas e Habitabilidade em Luas do Sistema Solar* e *Habitabilidade em Luas do Sistema Solar*, em ordem.

Sobre os autores

Eduardo Janot Pacheco (eduardo.janot@iag.usp.br) possui doutorado em Astrophysique et Techniques Spatiales - Université de Paris VII (1987). Desenvolve pesquisa principalmente nos seguintes temas: estrelas Be, astrossismologia, astrofísica estelar, binárias de raios X, altas energias, astrobiologia e exoplanetas. Presidiu o Comitê CoRoT Brazil, que representa o país junto à missão espacial CoRoT, cuja finalidade foi a descoberta de exoplanetas e a astrossismologia (2002-2021) e foi membro do Scientific Committee do satélite CoRoT (agência espacial francesa CNES-França). Foi representante brasileiro no PLATO 2.0 Mission Consortium Board (2014-2021). Foi presidente da Sociedade Astronômica Brasileira e da Sociedade Brasileira de Astrobiologia. É professor Senior do IAG-USP e pesquisador ID do CNPq.

Vitória Bellecerie da Fonseca (vitoriabfonseca@usp.br) é aluna de graduação do Bacharelado em Astronomia no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG-USP). Desde 2020 é bolsista CNPq - PIBIC de Iniciação Científica na área de astrobiologia e habitabilidade de luas do Sistema Solar, em especial Enceladus e Europa. É voluntária no Projeto Astrominas (IAG-USP).

Referências

- [1] K. Olsson-Francis et al., *Editorial: Habitability beyond Earth*, *Front. Microbiol.* **9**, 2645 (2018).
- [2] J. F. Kasting, D. P. Whitmire e R. T. Reynolds, *Habitable zones around Main Sequence Stars*, *Icarus* **101**(1), 108 (1993).
- [3] R. Shapiro, *Origin of life: crucial issues*, in *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*, editado por W. T. Sullivan

- III e J. Baross (Cambridge University Press, 2007).
- [4] J. I. Lunine, *Ocean worlds exploration*, *Acta Astronaut.* **131**, 123 (2017).
- [5] D. R. Williams, *Solar System Small Worlds Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2016). Disponível em https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/galileanfact_table.html, acesso em jun. 2022.
- [6] D. R. Williams, *Jovian Satellite Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2018). Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/joviansatfact.html>, acesso em jun. 2022.
- [7] D. R. Williams, *Saturnian Satellite Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2019). Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/saturniansatfact.html>, acesso em jun. 2022.
- [8] *Enceladus*, NASA Solar System Exploration. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/moons/saturn-moons/enceladus/by-the-numbers/>, acesso em jun. 2022.
- [9] D. R. Williams, *Moon Fact Sheet*, NASA Space Science Data Coordinated Archive (2021). Disponível em <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/moonfact.html>, acesso em jun. 2022.
- [10] G. Mitri et al., *Exploration of Enceladus and Titan: investigating ocean worlds' evolution and habitability in the Saturn system*, *Exp. Astron.* (2021).
- [11] E. Garcia-Lopez e C. Cid, *Glaciers and ice sheets as analog environments of potentially habitable icy worlds*, *Front. Microbiol.* **8**, 1407 (2017).
- [12] L. Carré et al., *Relevance of earth-bound extremophiles in the search for extraterrestrial life*, *Astrobiology* **22**(3), 322 (2022).
- [13] I. von Hegner, *An ab initio definition of life pertaining to Astrobiology* (2019). Disponível em <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02272413>, acesso em ago. 2022.
- [14] R. Heller et al., *Formation, habitability, and detection of extrasolar moons*, *Astrobiology* **14**(9), 798 (2014).
- [15] M. Schulte et al., *Serpentinization and its implications for life on the early Earth and Mars*, *Astrobiology* **6**(2), 364 (2006).
- [16] P. Judge, *A novel strategy to seek biosignatures at Enceladus and Europa*, *Astrobiology* **17**(9), 852 (2017).
- [17] J. Kotlarz et al., *Microbial component detection in Enceladus snowing phenomenon*, *Astrophys. Bull.* **75**(2), 166 (2020).
- [18] R.-S. Taubner et al., *Biological methane production under putative Enceladus-like conditions*, *Nat. Commun.* **9**(1), 748 (2018).
- [19] K. Takai, *Methanothermococcus okinawensis sp. nov., a thermophilic, methane-producing archaeon isolated from a Western Pacific deep-sea hydrothermal vent system*, *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* **52**(4), 1089 (2002).
- [20] S. Ferraz-Mello, *Dynamics of galilean satellites. An introductory treatise* (Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979).
- [21] Working Group for Planetary System Nomenclature (WGPSN), *Planet and Satellite Names, Discoverers and Themes*, Gazetteer of Planetary Nomenclature. Disponível em <https://planetarynames.wr.usgs.gov/Page/Planets>, acesso em jan. 2022.
- [22] R. Greenberg, *Unmasking Europa* (Springer, New York, NY, 2014), 2008 ed.
- [23] E. Lesage et al., *Constraints on effusive cryovolcanic eruptions on Europa using topography obtained from Galileo images*, *Icarus* **361**(114373), 114373 (2021).
- [24] M. Melwani Daswani et al., *A metamorphic origin for Europa's ocean*, *Geophys. Res. Lett.* **48**(18), e2021GL094143 (2021).

- [25] M. A. Hesse et al., *Downward oxidant transport through Europa's ice shell by density-driven brine percolation*, *Geophys. Res. Lett.* **49(5)** (2022).
- [26] A. P. Vid'machenko et al., *Asymmetry of reflective properties of the hemispheres of Jupiter satellite Europa*, *Astronomical School's Report* **7(1)**, 133 (2011).
- [27] A. P. Crósta et al., *Exploring Habitability Conditions in Titan's Impact Record: The Formation of Menrva Crater*, in *52nd Lunar and Planetary Science Conference* (2021), Lunar and Planetary Science Conference, 2309. Disponível em <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2021/pdf/2309.pdf>, acesso em ago. 2022.
- [28] *Titan*, NASA Solar System Exploration. Disponível em <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/science/titan/>, acesso em jun. 2022.
- [29] J. Stevenson, J. Lunine e P. Clancy, *Membrane alternatives in worlds without oxygen: Creation of an azotosome*, *Sci. Adv.* **1(1)**, e1400067 (2015).
- [30] G. R. Osinski et al., *The role of meteorite impacts in the origin of life*, *Astrobiology* **20(9)**, 1121 (2020).
- [31] A. M. Schoenfeld, A. Yin e E. Leonard, *A dust-devil-like vortex in Enceladus' ocean: a model for rapid transport of hydrothermal products from ocean floor to erupting ice-shell fractures*, in *51st Lunar and Planetary Science Conference* (2020). Disponível em <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/2821.pdf>, acesso em ago. 2022.
- [32] K. Zhang e F. Nimmo, *Internal structure of Enceladus and Dione from Orbital Constraints*, in *40th Lunar and Planetary Science Conference* (2009). Disponível em <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/2199.pdf>, acesso em ago. 2022.
- [33] C. J. Hansen, L. W. Esposito e A. R. Hendrix, *Ultraviolet observation of Enceladus' plume in transit across Saturn, compared to Europa*, *Icarus* **330**, 256 (2019).
- [34] A. P. Ingersoll, S. P. Ewald e S. K. Trumbo, *Time variability of the Enceladus plumes: Orbital periods, decadal periods, and aperiodic change*, *Icarus* **344(113345)**, 113345 (2020).
- [35] B. D. Teolis et al., *Enceladus plume structure and time variability: Comparison of cassini observations*, *Astrobiology* **17(9)**, 926 (2017).
- [36] T. Cavalié et al., *Herschel map of saturn's stratospheric water, delivered by the plumes of enceladus*, *Astron. Astrophys.* **630**, A87 (2019).
- [37] *Enceladus the Powerhouse* (2011). Disponível em <https://www.jpl.nasa.gov/images/enceladus-the-powerhouse>, acesso em jun. 2022.
- [38] *Perguntas frequentes*, Itaipu Binacional. Disponível em <https://www.itaipu.gov.br/sala-de-imprensa/perguntas-frequentes>, acesso em mar. 2021.
- [39] L. F. Coelho e Z. Martins, *The Geochemistry of Icy Moons*, in *Encyclopedia of Geology*, 2 ed., editado por D. Alderton e S. A. Elias (Academic Press, Oxford, 2021), 207.
- [40] M. Benisty et al., *A circumplanetary disk around PDS70c*, *Astrophys. J. Lett.* **916(1)**, L2 (2021).
- [41] D. Kipping et al., *An exomoon survey of 70 cool giant exoplanets and the new candidate Kepler-1708 b-i*, *Nat. Astron.* **6(3)**, 367 (2022).

Procura de vida extraterrestre: habitabilidade do sistema planetário Gliese 667C

J. A. de Freitas Pacheco

Observatoire de la Côte d'Azur, France

Resumo

Neste breve artigo são discutidas as condições de habitabilidade de exoplanetas, em particular aquelas que afetam diretamente a existência de água líquida na superfície. O clima dos planetas depende fortemente da presença de uma atmosfera, dos gases relacionados com o efeito estufa e do ciclo do carbono-silicato, que garante a estabilidade do clima em escalas geológicas. Uma aplicação é feita ao sistema planetário presente em Gliese 667C, constituído por cinco “super-Terras”. Mostraremos que apenas Gliese 667C c apresenta condições climáticas adequadas ao desenvolvimento da vida.

Abstract

In this short paper are discussed the habitability conditions of exoplanets and, in particular, those affecting directly the presence of liquid water at the surface. The climate of planets depends strongly on the presence of an atmosphere, on the greenhouse gases and on the carbon-silicate cycle, which guarantees the climate stability over geological timescales. These ideas are applied to the planetary system present in Gliese 667C constituted by five “super-Earths”. The present analysis suggests that only Gliese 667C c has climate conditions adequate for the emergence of life.

Palavras-chave: astrobiologia, Gliese 667C, exoplanetas, habitabilidade, emergência da vida.

Keywords: astrobiology, Gliese 667C, exoplanets, habitability, life emergency.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38324](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38324)

1 Introdução

A Astrobiologia é um campo multidisciplinar cujo objetivo é investigar a existência de vida extraterrestre, seja qual for seu nível de evolução. A questão da presença de vida em outros mundos tem sido debatida desde a Antiguidade e, em particular, durante o apogeu da civilização grega. Com a descoberta do primeiro exoplaneta em 1995 pelos astrônomos suíços Michel Mayor e Didier Queloz, novas perspectivas surgiram para que especulações sobre vida extraterrestre estejam agora fundamentadas em bases mais sólidas.

A procura de vida extraterrestre necessita de algumas hipóteses simplificadoras que permitam a elaboração de um cenário, em geral baseado no que sabemos sobre a Terra, que permita ou favoreça a emergência da vida. Admitiremos, por exemplo, o princípio estabelecido por Norman Pace [1], o qual estabelece que a vida está fundamentada em processos físico-químicos universais otimizados e na capacidade de formação de cadeias moleculares pelo átomo de carbono.

Outras alternativas como, por exemplo, substituir o carbono pelo silício, estão excluídas pelas observações astronômicas, que mostram apenas moléculas carbonadas complexas nos objetos cósmicos, mesmo nos mais distantes.

Os organismos são “máquinas” que transformam e consomem energia do meio via um processo denominado “metabolismo”. Os organismos se replicam e os erros de replicação produzem evolução e diversificação segundo os princípios de Darwin. As formas mais primitivas, esperadas serem as mais comuns no universo, devem ter características de bactérias e/ou archaea, ou seja, dimensões de alguns microns, membrana envoltória rígida, podendo se desenvolver em ambientes extremos. Alguns micro-organismos podem sobreviver em um estado “inerte” por milhões de anos como, por exemplo, aqueles encontrados no pergelissolo siberiano [2] ou em “pérolas” de âmbar [3].

Os processos químicos que levam à emergência da vida estão relacionados com cadeias de reações

autocatalíticas envolvendo ciclos de autoalimentação [4]. Segundo este autor, o custo energético para a manutenção de tais reações autocatalíticas é da ordem de 150 kJ/mol. Isto significa que a manutenção da vida requer fontes de energia capazes de sustentar as reações consideradas. Deve-se salientar que a vida pode existir na ausência de fontes de luz através do uso, por exemplo, de fontes inorgânicas de energia. Este é o caso de micro-organismos quimiolitótrofos que se desenvolvem em uma biosfera subterrânea protegida da radiação solar [5].

A habitabilidade de um planeta refere-se à capacidade do mesmo em abrigar seres vivos. Tanto a habitabilidade como a emergência da vida dependem de características físico-químicas, bem como geológicas do ambiente considerado. A existência de água líquida é um fator fundamental, pois a água é praticamente um solvente “universal” capaz de estabilizar macromoléculas, orientar moléculas hidrofóbicas e hidrofílicas necessárias a emergência e ao desenvolvimento da vida. No entanto, é preciso salientar que a caracterização do ambiente é geralmente baseada no que se sabe dos nichos terrestres, mas a descoberta contínua de micro-organismos extremófilos tem permitido uma evolução permanente do conceito de habitabilidade [6].

Neste artigo apresentaremos uma breve revisão dos diferentes aspectos que devem ser considerados na habitabilidade de um planeta. Exemplificaremos a discussão com uma análise do sistema planetário Gliese 667C. Na Seção 2 examinaremos as condições astronômicas; na Seção 3 serão discutidas as condições físicas da superfície e a presença de uma atmosfera; na Seção 4 discutir-se-á o sistema Gliese 667C e, finalmente, na Seção 5 serão apresentadas as principais conclusões.

2 Aspectos astronômicos

Diferentes aspectos astronômicos afetam a habitabilidade de um planeta. Inicialmente, sua posição no disco protoplanetário na época de sua formação, não necessariamente coincidente com a posição atual no sistema. Isto porque o planeta pode migrar devido interações com o material do disco, bem como devido a ressonâncias orbitais com planetas gigantes. Mesmo na ausência de “júpiteres” pode ocorrer uma migração de “comboio”, onde todos os planetas migram devido a

ressonâncias em cadeia, como é o caso do sistema planetário Trappist-1 [7, 8]. A posição atual define a intensidade da radiação recebida da estrela central, fator preponderante no estabelecimento do clima que reinará no planeta. A posição inicial indica, via modelização do disco protoplanetário, se o planeta foi formado além ou aquém da linha de água, que define a zona a partir da qual a água pode se condensar e formar minerais hidratados. Estes minerais poderão estar presentes na crosta do planeta, caso este tenha sido formado além da linha de condensação, constituindo uma fonte de água que poderá ser liberada posteriormente através de processos de subducção e vulcanismo da crosta. Por exemplo, o silicato de magnésio $3(MgO) - 4(SiO_2) - H_2O$ contém 4.75% de água em massa, a qual pode ser liberada em temperaturas da ordem de 870 K. Retornaremos a este aspecto mais adiante.

Uma importante fração de sistemas planetários tem sido detectada em estrelas de tipo M , que dominam a população estelar da Galáxia. Estrelas M são, em geral, muito mais ativas que o Sol, sendo uma importante fonte de raios-X e de raios cósmicos de baixa energia (dezenas de MeV), produzidos durante erupções coronais. A maioria destes sistemas planetários contém planetas de curto período orbital (notar que há um viés de detecção em favor destes planetas), portanto próximos da estrela central. Neste caso, tais planetas estão submetidos a uma radiação energética que pode afetar a emergência e/ou o desenvolvimento da vida, caso o planeta seja desprovido de um “escudo” magnético eficaz. Esta questão será abordada com mais detalhes em um artigo por A. Valio, incluído neste volume.

O primeiro exoplaneta descoberto, 51 Pegasi b, em 1995, é similar ao planeta Júpiter, mas encontra-se muito próximo de sua estrela, o que acarreta uma temperatura atmosférica bastante elevada. Desde então, inúmeros planetas deste tipo foram detectados, constituindo uma categoria denominada de “júpiteres quentes”. A explicação para a existência de planetas gigantes com curtos períodos orbitais é a migração destes durante as fases iniciais de formação. Por que isto não ocorreu no sistema solar? O processo de migração no disco protoplanetário é bastante complexo, mas simulações numéricas sugerem algumas explicações [9]. Júpiter é suficientemente massivo para criar uma brecha no disco protopla-

netário enquanto que Saturno, com menor massa, é incapaz. Nestas condições, Saturno continua interagindo com o material do disco, o que força uma aproximação com Júpiter, até que suas orbitas satisfaçam a condição de ressonância 2:3 entre seus períodos orbitais. Quando isso ocorre, os dois planetas ocupam a mesma brecha, mas a interação de Júpiter com a parte interna do disco transfere momento angular ao planeta, afastando-o do centro. Por outro lado, Saturno interage com a parte externa do disco, produzindo um efeito oposto. No entanto, sendo mais massivo, o torque exercido em Júpiter predomina e ambos os planetas migram agora para o exterior de tal forma que a condição de ressonância seja mantida. Isto constitui o chamado processo de “vai e vem”, que explica a existência júpiteres quentes em alguns exossistemas planetários, mas não no sistema solar. A migração reversa só é possível se a massa do planeta gigante externo for inferior ao do planeta gigante interior. As simulações indicam que a razão de massas deve estar no intervalo entre 1:4 e 1:2, condizente com a razão 1:3 satisfeita por Saturno e Júpiter no sistema solar.

A rotação do planeta é um outro fator que afeta o clima, pois define a sucessão dia-noite e a consequente redistribuição da energia recebida da estrela central. Planetas próximos da estrela central podem estar em rotação síncrona (períodos orbital e de rotação coincidentes) devido as forças de maré. Isto ocasiona uma irradiação constante do hemisfério iluminado e uma distribuição não uniforme da temperatura ao longo da superfície. Em alguns casos, por exemplo, Corot-7b, o primeiro exoplaneta rochoso detectado, a temperatura estimada na região iluminada é da ordem de 1700 K, o que forma um verdadeiro “oceano de lava” na superfície. No entanto, as diferenças de temperatura entre o lado iluminado e o lado escuro podem ser amenizadas por fluxos convectivos da atmosfera, que transportam energia do lado diurno para o noturno. A inclinação do eixo de rotação é outro fator importante, pois permite a existência de ciclos inverniais e estivais. A irradiação sofrida pelo planeta depende da luminosidade da estrela central (ou de sua massa, pois para estrelas da Sequência Principal, existe uma relação massa-luminosidade bem definida) e também de sua temperatura efetiva. Esta última define a região espectral onde o máximo de energia irradiada ocorre, o que pode afetar, por exemplo,

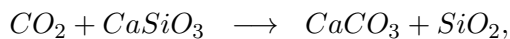
o processo de fotossíntese e as características físicas de seres complexos que porventura tenham emergido no planeta.

3 Características físicas requeridas

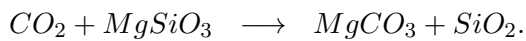
Para a emergência e o desenvolvimento da vida, mesmo em suas formas mais primitivas, isto é, micro-organismos monocelulares, a presença de água líquida é requerida. Isto significa que a temperatura da superfície deve estar em um intervalo de valores que depende da pressão atmosférica. Na Terra, tal intervalo varia entre 273 K, ponto de congelamento da água e 373 K, temperatura onde ocorre a vaporização. No entanto, em pressões mais elevadas, o estado líquido pode existir mesmo em temperaturas da ordem de 400-500 K. Por outro lado, a presença de sais dissolvidos na água podem abaixar o ponto de congelamento e o estado líquido pode permanecer mesmo em temperaturas inferiores a 273 K, o que explicaria a presença de oceanos subterrâneos em Europa, lua de Júpiter ou em Encélado, lua de Saturno. A temperatura ambiental depende de diversos fatores tais como: 1) a irradiação pela estrela central – a Terra, por exemplo, recebe do Sol um fluxo de 1360 W/m^2 ; 2) o albedo atmosférico e da superfície, que define a fração da radiação refletida pelo solo e/ou oceanos em relação a radiação incidente e 3) os gases responsáveis pelo efeito estufa tais como o CH_4 , o CO_2 e o vapor de água. A circulação atmosférica é outro fator importante no estabelecimento das condições climáticas, pois redistribui a energia da atmosfera entre as regiões equatorial e polares (células de Hadley), bem como entre os hemisférios diurno e noturno.

A vida média da molécula do CO_2 na atmosfera terrestre é da ordem de 300-1000 anos e o conteúdo do CO_2 atmosférico depende do ajuste entre os mecanismos de produção e de destruição. A produção do CO_2 é devida essencialmente aos processos de desgaseificação da crosta e a emissão vulcânica. No entanto, hoje na Terra, a produção do CO_2 devida a atividade humana é cerca de duas ordens de grandeza superior a produção natural. Diferentes processos químicos na atmosfera destroem o CO_2 e, em um planeta com atividade biótica vegetal, processos de fotossíntese convertem o CO_2 em O_2 , alterando a composição química da atmosférica, como ocorreu com a Terra

há 2,3 bilhões de anos. A produção do CO_2 em escalas de milhares de anos é intermitente, o que pode levar a eras de baixas temperaturas, como as diferentes glaciações ocorridas durante a história da Terra. Em escalas de tempo geológicas, a produção natural do CO_2 é mais “uniforme” enquanto que os processos de sequestro resultam da absorção pelos oceanos e subsequente intemperismo associado ao processo de subducção do fundo oceânico, bem como da interação com silicatos das rochas da superfície (intemperismo) via reações de Urey, isto é,



ou



Estas reações absorvem o CO_2 atmosférico produzindo carbonatos de cálcio ou de magnésio que, em seguida, serão transportados ao manto interno pelos processos de subducção relacionados com a tectônica de placas. Assim, o controle atmosférico do CO_2 necessita de uma atividade tectônica. Este mecanismo não é operativo se a superfície continental for inferior a 10^{-4} da superfície total do planeta [10]. Convém lembrar que a cadeia de ilhas havaianas representa cerca de $2,9 \times 10^{-5}$ da superfície terrestre.

A massa M_C de CO_2 na atmosfera é controlada por uma equação da forma [11, 12]

$$\frac{dM_C}{dt} = V - W_{con} - W_{oce} \quad (1)$$

onde V representa as emissões de CO_2 (desgaseificação da crosta e vulcanismo), enquanto que W_{con} e W_{oce} representam os diferentes processos de sequestro do CO_2 , principalmente os devido ao intemperismo continental e oceânico. Atualmente, na Terra, as emissões naturais de CO_2 representam um valor da ordem de 330 Mt/ano (Mt/ano = mega toneladas por ano), segundo as estimativas da Ref. [13], mas a incerteza deste valor é bastante elevada. Em comparação, as emissões devido a atividade humana, segundo dados de 2020 do Banco Mundial, são da ordem de 35.000 Mt/ano, ou seja, duas ordens de grandeza superior. A função W_{con} descrevendo o intemperismo depende da temperatura da superfície e da pressão relativa do CO_2 na atmosfera (ver, por exemplo, a Ref. [14]) enquanto que W_{oce} depende praticamente da temperatura [10].

Em geral, a variação da pressão relativa do CO_2 ocorre em uma escala de tempo da ordem de milhares de anos e, em primeira aproximação, pode-se considerar uma situação de equilíbrio tal que $V - W_{con} + W_{oce} = 0$, condição aproximadamente satisfeita atualmente na Terra. A solução desta equação permite determinar a temperatura da superfície em função da pressão relativa do CO_2 na atmosfera, no caso de uma situação estabilizada do clima. Nestas condições, a evolução da temperatura depende fortemente da atividade vulcânica. No caso da Terra, a atividade vulcânica foi muito mais importante no passado e, conseqüentemente, a concentração do CO_2 deve ter sido mais elevada. Por outro lado, a relação entre temperatura e concentração do CO_2 pode ser calculada igualmente a partir de um modelo de atmosfera, que será discutido mais adiante. A solução comum indica tanto o valor da temperatura como o da concentração do CO_2 que estabilizam o clima.

Em escalas da ordem de alguns milhões de anos a emissão vulcânica varia, produzindo flutuações na temperatura média da Terra, o que afeta o clima. Camadas de gelo da região Antártica (estação Vostok) indicam que, nos últimos 400.000 anos houveram variações com intervalos da ordem de 100.000 anos na concentração do CO_2 atmosférico, fortemente correlacionadas com as variações de temperatura. Os dados indicam que a concentração do CO_2 oscilou entre 190 ppmv e 290 ppmv (notar que, em 2021, devido a atividade humana, a concentração medida foi de 416 ppmv) enquanto que a temperatura média global oscilou entre $18^\circ C$ e $10^\circ C$ (lembrar que o valor de referência pré-industrial é $15^\circ C$). Há 500 milhões de anos, a temperatura era da ordem de $33^\circ C$. Com o forte desenvolvimento da vegetação na chamada “explosão do Cambriano”, o CO_2 começou a ser estocado e a temperatura caiu para valores da ordem de $18^\circ C$ em apenas 50 milhões de anos. Entre 270 e 370 milhões atrás houve uma redução na atividade vulcânica, resultando em uma fase de resfriamento do clima, com temperaturas da ordem de $10^\circ C$. Há 250 milhões de anos, no fim do período Permiano, havia um único continente, a Pangeia e um único oceano, o Pantalassa. Uma importante atividade vulcânica ocorreu nesse momento, produzindo um enorme derramamento de lava na região hoje conhecida como Sibéria, a qual produziu um aumento da

temperatura ($33^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$). Esta forte atividade vulcânica não somente aumentou a temperatura, mas também diminuiu a produtividade básica da cadeia alimentar, causando uma das maiores extinções de massa conhecidas da história da Terra, onde desapareceram cerca de 96% das espécies marinhas e 76% das espécies terrestres.

A curta digressão acima ilustra a dificuldade em conhecer-se a evolução do clima terrestre e como os nichos de vida foram afetados tendo em vista a complexidade dos fatores que os afetam. Fica claro que o conhecimento da habitabilidade de um exoplaneta será sempre limitado pelo número restrito de parâmetros que se pode obter a partir de observações feitas tanto a partir do solo como do espaço próximo.

3.1 Atmosferas planetárias

Se a Terra fosse desprovida de uma atmosfera, a temperatura superficial seria o resultado do balanceamento entre a energia radiativa recebida do Sol e aquela irradiada para o espaço no infravermelho. Se introduzirmos uma atmosfera e desprezarmos inicialmente os efeitos de retroalimentação, apenas efeitos de difusão e absorção da radiação solar estarão presentes. Assim, cerca de 22,5% da radiação solar incidente na Terra é espalhada pelas moléculas da atmosfera (espalhamento Rayleigh) e pelas gotículas de vapor de água que constituem as nuvens (espalhamento de Mie). Incluindo-se os 8,7% refletidos em média pela superfície, o balanceamento energético permite estimar uma temperatura de equilíbrio da ordem de -20°C (253 K). Se esta fosse a temperatura da Terra, não haveria água líquida na superfície. No entanto, a temperatura observada é aproximadamente $+15^{\circ}\text{C}$ (288 K), fato que pode ser explicado se a atmosfera agir como um “cobertor”, providenciando um aquecimento adicional da superfície. Tal efeito de “cobertor” é conhecido na literatura como efeito “estufa”.

Em poucas palavras, o efeito “estufa” pode ser assim explicado: a radiação solar absorvida pela superfície é termalizada e irradiada na região infravermelha do espectro. Parte desta radiação infravermelha é absorvida por gases que contribuem ao efeito estufa, como o CO_2 , o CH_4 e o vapor de água. A re-emissão desta radiação pelas moléculas em questão produz um campo difuso de radiação infravermelha na atmosfera. Parte desta radiação escapa para o espaço e parte é

reabsorvida pela superfície, contribuindo ao balanço energético que fixa a temperatura continental e oceânica.

Embora a física da atmosfera seja bastante complexa, vamos considerar aqui, por razões didáticas, um modelo muito simples que permite entender o mecanismo do efeito estufa. Vamos supor que a atmosfera esteja em equilíbrio hidrostático, desprezando-se todo o processo de circulação atmosférica. Considera-se que o transporte radiativo é dominante, o que significa a não inclusão de processos convectivos que, certamente, tem um papel importante nas camadas atmosféricas próximas do solo. Nestas condições, pode-se mostrar que a temperatura da superfície é dada aproximadamente por

$$T_S = 278 \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{1/4} \frac{(1-A)^{1/4}}{\sqrt{a}} G(\tau_0) \text{K}. \quad (2)$$

Na equação acima, L é a luminosidade bolométrica da estrela central, L_{\odot} é a luminosidade do Sol, A é o albedo do planeta (atmosfera + superfície) na região visível do espectro e a é a distância entre o planeta e a estrela em unidades astronômicas. O efeito estufa está representado pela função $G(\tau_0)$, onde τ_0 é a profundidade ótica da atmosfera no infravermelho. Se $\tau_0 = 0$, ou seja $G(0) = 1$, não há efeito estufa. Uma solução analítica da solução da equação de transferência radiativa com as condições explicitadas acima e válida para $\tau_0 < 1$ é

$$G(\tau_0) = \left(1 + \frac{\tau_0}{2} \right)^{1/4}. \quad (3)$$

Para simplificar o modelo, considera-se que o efeito estufa esteja dominado pelo CO_2 , que possui duas importantes bandas de absorção no infravermelho em torno de 4,2 mm e 16 mm. Neste caso, para uma atmosfera cuja densidade varia exponencialmente com a altura, a profundidade ótica no infravermelho é

$$\tau_0 = k_{IV} \frac{(p\text{CO}_2)}{g}, \quad (4)$$

onde k_{IV} (em m^2/kg) é o coeficiente de absorção por unidade de massa, $p\text{CO}_2$ é a pressão parcial do CO_2 na atmosfera e g é a aceleração da gravidade do planeta. Levando-se em conta as bandas de absorção do CO_2 acima mencionadas, pode-se colocar a expressão da profundidade ótica na

forma

$$\tau_0 = 1.3 \times 10^8 P \frac{(pCO_2)}{\mu g}. \quad (5)$$

Na expressão acima, μ é a massa molecular dos gases atmosféricos, a pressão atmosférica P e a pressão parcial do CO_2 são dadas em bar e a aceleração da gravidade em cm/s^2 . Notar que o surgimento da pressão atmosférica P na expressão (5) deve-se ao fato que todas as moléculas presentes na atmosfera afetam os níveis da molécula do CO_2 via colisões.

Um teste para as relações acima pode ser feito com a evolução da temperatura da Terra nestas últimas décadas devido a ação humana. Usando-se as equações (2), (3) e (5), a variação da temperatura causada por uma variação da pressão parcial do CO_2 é dada por

$$\frac{\Delta T_S}{T_S} = \frac{1}{8} \frac{\tau_0}{1 + \tau_0/2} \frac{\Delta pCO_2}{pCO_2} \approx 0,10 \frac{\Delta pCO_2}{pCO_2} \quad (6)$$

O coeficiente numérico é obtido a partir do valor da profundidade ótica requerida para o efeito estufa terrestre, isto é, $\tau_0 = 1,358$. Entre 1960 e 2000, a concentração do CO_2 variou de 317 ppmv a 368 ppmv, correspondendo a um aumento de 16%. Neste caso, a equação (6) prediz um aumento na temperatura de 1,6% , que concorda aproximadamente com a variação de 1,0% observada.

A estimativa da temperatura de um exoplaneta e, portanto, a consequente inferência da presença de água líquida na superfície e de sua consequente habitabilidade esbarra em uma dificuldade maior pois, para a maioria dos exoplanetas rochosos, não temos informações diretas sobre a presença ou não de uma atmosfera.

Com o início próximo das operações do telescópio espacial James Webb, tal situação deve evoluir. Espectros de exoplanetas tanto em transmissão como em reflexão deverão ser obtidos, permitindo a detecção de atmosferas, se existirem. Na região “azul” do espectro ($0,3 \mu m - 0,4 \mu m$), o espalhamento Rayleigh pode indicar um valor aproximado da pressão atmosférica enquanto que largas bandas de absorção por volta de $0,51 \mu m$ e $0,69 \mu m$ podem indicar a presença de vegetação. Por outro lado, a presença do vapor de água pode ser evidenciada por absorções no infravermelho nos comprimentos de onda $0,73 \mu m$, $0,82 \mu m$ e $0,93 \mu m$. A atividade vulcânica, além de importantes quantidades de vapor de água, gera dióxido de carbono que, como vimos anteriormente,

possui bandas no infravermelho as quais podem ser detectadas em espectros a serem obtidos pelo James Webb. O metano pode ser também detectado através de suas bandas em $0,54 \mu m$, $0,63 \mu m$, $1,6 \mu m$ e $2,3 \mu m$. Embora o metano possa ser produzido por vários mecanismos abióticos, sua produção por bactérias metanogênicas é outra possibilidade, sendo assim um importante indicador de possíveis formas de vida bacteriana no planeta considerado.

Embora existam modelos climáticos adaptados para o estudo de exoplanetas bastante sofisticados (ver, por exemplo, Refs. [15–18]), as conclusões deles extraídas ficam comprometidas pelo desconhecimento das propriedades da atmosfera tais como a pressão na superfície e composição química.

A maioria dos planetas rochosos deve, após algumas centenas de milhões de anos, ter perdido sua atmosfera primitiva, constituída essencialmente por hidrogênio e hélio. Além da perda via o mecanismo de Jeans, estrelas de tipo espectral M são particularmente ativas na sua juventude para injetar energia suficiente na atmosfera dos planetas próximos, acelerando sua perda. Assim, após 1-2 bilhões de anos, a atmosfera do planeta é provavelmente secundária, tendo como fontes a desgaseificação da crosta e o vulcanismo. Em outras palavras, as moléculas mais abundantes destas atmosferas secundárias devem ser o CO_2 , o vapor de água e, em menor quantidade o N_2 . Como a atividade tectônica depende da área da superfície, portanto do raio do planeta e como os planetas rochosos possuem uma relação massa vs raio, devemos esperar que, em primeira aproximação, a pressão atmosférica deve depender da massa do planeta M_P , isto é, $P \propto M_P^k$. Para estimar o expoente k , os autores da Ref. [15] consideraram que a massa da atmosfera é diretamente proporcional a massa do planeta, o que implica para a pressão

$$P \propto \frac{M_{atm} M_P}{R_p^4}. \quad (7)$$

Em seguida, tais autores adotaram uma relação massa versus raio da forma $M_p \propto R_p^{3,2}$, que permite a obtenção de uma relação pressão versus massa dada pela expressão $P \propto M_p^{0,75}$. Tal solução, se aplicada ao sistema solar, é certamente inadequada pois prediz para Marte uma pressão atmosférica da ordem de 190 mbar, duas ordens de grandeza superior ao valor observado.

Neste artigo descrevemos um procedimento empírico baseado nas informações existentes sobre atmosferas de corpos do sistema solar. Na Figura 1 é mostrada a variação da pressão atmosférica em função da massa de corpos como a Terra, Marte, Plutão e Tritão (o maior dos satélites de Netuno).

Utilizando estes quatro corpos do sistema solar obtém-se uma relação entre a massa da atmosfera M_{atm} e a massa do planeta M_p da forma $M_{atm} \propto M_p^{1,82}$. Não foram incluídos neste gráfico nem o planeta Vênus nem Titã, satélite de Saturno, pois possuem pressões anormalmente elevadas para suas massas, cujas causas não serão discutidas aqui. A hipótese da generalização da relação obtida pode ser criticada por várias razões tais como: o número reduzido de objetos na amostra (apenas quatro) e a desconsideração que tais corpos tiveram histórias geológicas distintas. Embora consciente destes aspectos discutíveis, iremos aqui adotar a relação em questão baseado em um “princípio” atribuído a Lorde Kelvin: “melhor um metro de meio metro do que nenhum metro”. A segunda diferença em relação ao tratamento da Ref. [15] concerne a relação massa vs raio. Utilizando somente planetas da classe I [19], mais os planetas do sistema solar (Vênus, Terra e Marte) e os sete planetas do sistema Trappist-1 [20], obtém-se uma relação massa vs raio da forma $M_p \propto R_p^{3,84}$. Em seguida, utilizando as relações obtidas e a Eq. (7) obtém-se que a pressão varia com a massa do planeta segundo $P \propto M_p^{1,87}$. Esta relação prediz uma pressão para Marte que difere apenas de um fator 3 do valor observado, o que é mais aceitável face aos objetivos deste artigo.

4 Habitabilidade do sistema Gliese 667C

O sistema estelar Gliese 667 (GJ 667) é constituído por três estrelas. Um par próximo, A e B, separados por uma distância aproximada de 12,6 u.a. e uma terceira componente C, que orbita em torno do par a uma distância da ordem de 230 u.a. A distância do sistema da Terra é de aproximadamente 6,9 pc, situando-o nas cercanias do sistema solar. As propriedades deste sistema estelar estão resumida na Tabela 1.

Em torno da componente C foi descoberto um sistema planetário onde apenas cinco planetas dos seis (ou sete?) anunciados na Ref. [21] foram

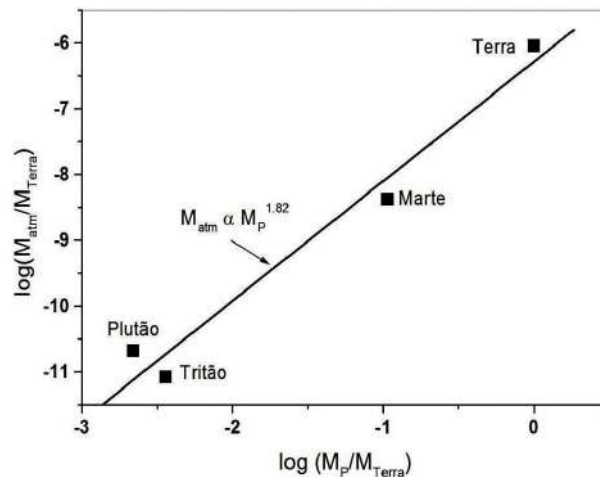


Figura 1: Relação entre a massa da atmosfera, estimada a partir da pressão na superfície, observada direta ou indiretamente, e a massa do planeta.

Tabela 1: Propriedades do sistema estelar GJ 667. A primeira coluna identifica a componente, a segunda e a terceira colunas indicam o tipo espectral e a temperatura efetiva enquanto que as duas últimas fornecem os valores das massas e luminosidades em unidades solares.

Componente	TSp	$T_{ef}(K)$	M/M_{\odot}	L/L_{\odot}
A	K3V	4430	0,73	0,47
B	K5V	4130	0,65	0,086
C	M1.5V	3590	0,33	0,0139

confirmados por subsequentes observações espectroscópicas. A estrutura deste sistema planetário é similar à do planeta Tatoine, onde teria nascido Luke Skywalker, herói descrito na série de filmes Guerra nas Estrelas, de George Lukas. As propriedades físicas dos 5 planetas confirmados e que constituem o sistema de GJ 667C são apresentadas na Tabela 2. As massas indicadas na coluna 2 são valores médios de diferentes análises listadas no catálogo de exoplanetas da NASA (<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>), obtidas por observações espectroscópicas e limitadas pelo desconhecimento do ângulo de inclinação da órbita. Na ausência de observações de trânsitos, que permitiriam uma estimativa tanto da inclinação da órbita como do raio do planeta, admitiu-se que $\sin i = 1$ e usou-se a relação massa vs raio para planetas de classe I no cálculo dos valores dos raios dados na coluna 3. O conhecimento da massa e do raio permite uma estimativa da densidade média. Os valores são consistentes com os esperados para planetas rochosos do tipo “super-Terras” incluídos na classe

Tabela 2: Propriedades físicas do sistema GJ 667C. A primeira coluna identifica o planeta, as duas seguintes indicam a massa e o raio em unidades terrestres, a quarta coluna fornece a distância à estrela central em unidades astronômicas, a quinta e a sexta colunas indicam respectivamente a densidade média e a pressão atmosférica esperada, enquanto que a última coluna fornece a fração da massa do planeta constituindo o núcleo de Fe-Ni.

Planeta	$M_p \text{ sen } i/M_T$	R_p/R_T	$a(\text{u.a.})$	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$P_{at}(\text{bar})$	M_c/M_p
b	5.64	1.55	0.0500	8.34	21,9	0.362
c	4.03	1.42	0.1245	7.75	12,1	0.383
f	2.70	1.28	0.1560	7.10	5,9	0.394
e	2.70	1.28	0.2130	7.10	5,9	0.394
g	4.60	1.47	0.5490	7.98	15,3	0.376

I. Modelos com duas camadas (núcleo de Fe-Ni e manto de silicatos) foram utilizados para estimar a massa do núcleo em relação a massa do planeta, dados na sétima coluna da Tabela 2.

A presença (ou não) de água nesses planetas depende da quantidade da mesma contida em minerais hidratados, a qual pode ser extraída para a formação de oceanos, via subducção e vulcanismo. No caso do sistema solar, a quantidade de água disponível em sais e/ou minerais hidratados pode ser estimada através dos meteoritos. Os meteoritos ferrosos, ricos em ferro, níquel e outros metais pesados, possuem menos de 0,01% de água em massa enquanto os condritos tipo E (enstatita) possuem entre 0,04% a 0,08% de água em massa. Ambas categorias devem ter sido formadas aquém da linha de água que, no sistema solar, situa-se aproximadamente a uma distância de 2,2 u.a. do Sol. Uma fração maior de água pode ser encontrada nos condritos ordinários (0,4%) e nos condritos carbonados (4-5 %), cuja origem situa-se além da linha da água. Os condritos carbonados tiveram certamente um papel importante na formação dos oceanos terrestres, pois a razão isotópica D/H da água presente nesses corpos é praticamente a mesma encontrada na Terra. Por outro lado, experiências de laboratório nas quais amostras de meteoritos do tipo condrito carbonados são aquecidas a 1470 K [22] indicam que o processo de desgaseificação simulado tem, em média, a seguinte composição: H_2O (66%), CO (18%), CO_2 (15%) e o restante constituído por H_2 e H_2S . Tais experiências confirmam que minerais hidratados presentes nestes blocos rochosos são uma importante fonte de água quando aquecidos suficientemente. Mais contundente ainda é a descoberta recente da Ref. [23] que, analisando alguns meteoritos do tipo condritos carbonados,

descobriram a presença de um fluido constituído por uma mistura de CO_2 e H_2O em inclusões nanométricas presentes nos cristais de calcita. Esta descoberta indica que tais corpos foram formados não somente além da linha de água mas também além da linha da “neve carbônica”.

No caso do sistema solar, o bombardeamento da Terra por tais meteoritos ricos em água e formados nas partes externas do disco protoplanetário foi possível graças a ação gravitacional dos planetas gigantes Júpiter e Saturno, bem como de seus movimentos migratórios através do disco protoplanetário. No entanto, no sistema GK 667C, até o presente, nenhum planeta gigante tipo Júpiter foi detectado. Neste caso, não se deve esperar que tenha havido um processo de difusão gravitacional dos pequenos corpos formados nos bordos externos do disco, ricos em água, para as regiões internas. Desta forma, uma questão prévia que deve ser respondida é a seguinte: os planetas presentes no sistema GJ 667C foram formados aquém ou além da linha de água? Para tanto, a adiábata descrevendo o disco protoplanetário deve ser comparada com a variação da pressão de saturação do vapor de água com a temperatura. Para os interessados no cálculo detalhado, sugerimos a leitura do apêndice A7 da obra citada anteriormente [19], onde o método é aplicado para o sistema solar.

Sem entrar em maiores detalhes e apenas por uma questão de completeza, indicamos os passos mais importantes. A densidade projetada (gás + sólidos) do disco protoplanetário que deu origem ao sistema de GJ 667C pode ser modelizada pela expressão geral

$$\Sigma = \Sigma_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \quad (8)$$

onde $\Sigma_0 = 1,86 \times 10^4 \text{ g/cm}^3$ e o expoente vale $n =$

2,108 (parâmetros adequados para GJ 667C). A distancia de referência r_0 é tomada igual a 1 u.a. Com os valores em questão, a massa inicial do disco protoplanetário, com dimensões supostas entre 0,01 u.a. e 2,0 u.a. é da ordem de 26% da massa da estrela central. Nestas condições, pode-se mostrar que a pressão no centro do disco é dada por

$$P(r) = \Sigma_0 \left(\frac{GM_*}{2\pi r_0^3} \right)^{1/2} \times \left(\frac{kT_0}{\mu m_p} \right)^{1/2} \left(\frac{r_0}{r} \right)^{(4n+7)/4} \quad (9)$$

onde M_* é a massa de GJ 667C (ver Tabela 1) e T_0 é a temperatura do material do disco na distância de referência. Supondo-se que a temperatura resulta do equilíbrio radiativo obtém-se

$$T(r) = T_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1/2} \quad (10)$$

É preciso salientar-se que no cálculo da temperatura de referência deve-se utilizar a luminosidade inicial da estrela, 35% maior que o valor atual dado na Tabela 1. Neste caso, $T_0 = 103$ K.

A variação das pressões em função da temperatura é mostrada na Figura 2 onde, igualmente, estão localizados os planetas do sistema em suas posições atuais. Uma breve análise da Figura 2 indica que o cruzamento das curvas (linha da água) ocorre na temperatura $T = 390$ K, correspondente a uma distância de 0,07 u.a. Isto significa que a água pode se condensar somente para distâncias superiores 0,07 u.a. Pela figura constata-se que, com exceção do planeta b, o mais próximo da estrela central, os demais podem conter um manto rico em minerais hidratados e voláteis. Neste caso, considerando uma camada da ordem de 35 km do manto silicatado acima do magma, a água contida em silicatos hidratados presentes em cada planeta (c, f, e, g) representa uma quantidade média equivalente a 2,8 vezes a massa dos oceanos terrestres.

4.1 O clima nos planetas do sistema GJ 667C

A análise efetuada na seção anterior mostra que, excetuando-se o planeta b, os demais formaram-se além da linha de água o que significa que o manto pode incluir minerais hidratados e materiais voláteis condensados. A ausência

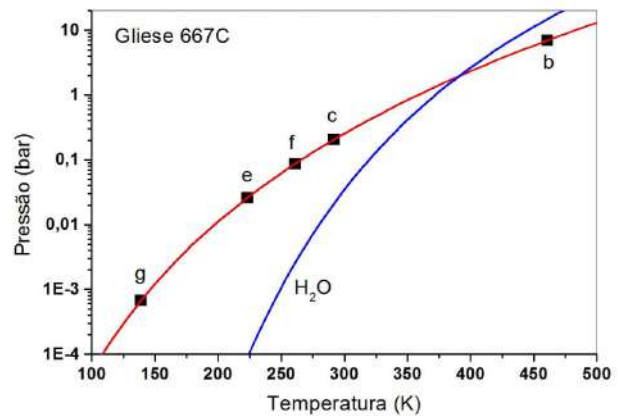


Figura 2: Determinação da linha de água no sistema GJ 667C. A curva azul corresponde a pressão de saturação do vapor de água enquanto que a vermelha corresponde a adiábata do disco protoplanetário. A posição dos planetas se encontra igualmente indicada.

de planetas gigantes gasosos no sistema planetário GJ 667C sugere que o planeta b, tendo sido formado aquém da linha de água, não foi provavelmente enriquecido por meteoritos do tipo condritos carbonados e deve ser desprovido de água.

Vamos admitir que os planetas rochosos do sistema GJ 667C possuam uma atmosfera secundária produzida pela desgaseificação da crosta e vulcanismo, sendo inicialmente rica em CO_2 , N_2 e vapor de água. Ao longo da evolução do planeta, a abundância do CO_2 é fortemente reduzida pela absorção de eventuais oceanos e pelo intemperismo continental ligado as reações de Urey. Após 1-2 bilhões de anos, a atmosfera será provavelmente dominada pelo N_2 e, em menor proporção, pelo CO_2 . Nestas condições, podemos supor que as atmosferas dos planetas rochosos de GJ 667C (talvez com exceção do planeta b, onde deve predominar o CO_2) sejam constituídas atualmente de N_2 , componente dominante e traços de CO_2 . Não podemos excluir que a emergência da vida tenha modificado a composição destas atmosferas, como o ocorrido com a Terra, que se enriqueceu em oxigênio devido a fotossíntese efetuada por cianobactérias.

As abundâncias do CO_2 atmosférico devem estar compreendidas entre um valor máximo e um mínimo definidos por: 1) acima do máximo forma-se uma atmosfera úmida saturada, que pode levar à perda total da água do planeta [16, 24]; 2) abaixo do mínimo o efeito estufa não consegue manter a água no estado líquido e a superfície do planeta permanece constantemente congelada.

Tabela 3: Clima em GJ667C c – a primeira coluna indica a cobertura oceânica considerada, a segunda e a terceira apresentam a temperatura média de equilíbrio e os valores correspondentes da pressão parcial do CO_2 para o modelo radiativo. A quarta e a quinta, idem para o modelo radiativo-convectivo.

Cobertura oceânica	T_s (K)	pCO_2 (bar)	T_s (K)	pCO_2 (bar)
30%	287	$1,22 \times 10^{-4}$	279	$7,08 \times 10^{-4}$
50%	288	$1,53 \times 10^{-4}$	280	$9,09 \times 10^{-4}$
70%	289	$2,66 \times 10^{-4}$	281	$1,28 \times 10^{-3}$

Dois modelos foram utilizados para o cálculo do efeito estufa. No primeiro, como descrito anteriormente, a atmosfera se encontra em equilíbrio radiativo e o efeito estufa é devido unicamente ao CO_2 . No segundo (modelo R-C), introduziram-se efeitos convectivos e tanto o vapor de água como o CO_2 contribuem agora para o efeito estufa.

A título de comparação, os perfis de pressão e de temperatura para as atmosferas da Terra e Gliese C c são mostrados na Figura 3. No caso da Terra, o modelo R-C computado é comparado com resultados dos valores padrões médios da atmosfera terrestre, podendo-se constatar um acordo razoável que viabiliza o modelo. Devido a maior massa de Gliese C c, a escala de altura da atmosfera é menor e a pressão na superfície é cerca de uma ordem de grandeza superior.

A modelagem do clima esperado para os planetas de Gliese C indica que:

- O planeta b, além de ter sido (provavelmente) formado aquém da linha de água, encontra-se muito próximo da estrela e, como consequência, sua temperatura resulta ser bastante elevada, podendo superar 383 K, valor de equilíbrio. Assim, o efeito estufa vai produzir temperaturas mais elevadas, criando um ambiente inóspito para a vida. Mesmo que o planeta fosse provido inicialmente de oceanos, a atmosfera estaria saturada de vapor de água devido as altas temperaturas, o que causaria a perda da mesma por fotodissociação [25].
- Os planetas f, e, g possuem temperaturas de equilíbrio respectivamente iguais a 217 K, 186 K e 138 K. Tais valores são extremamente baixos e o efeito estufa é incapaz de elevar a temperatura acima de 273 K, devido ao fato que a atmosfera ao se tornar opaca à radiação infravermelha atinge um limite, não mais produzindo uma temperatura mais elevada em função de aumentos

na concentração dos gases do efeito estufa. Desta forma, estes planetas devem possuir uma crosta gelada, constituída de água e de voláteis como a amônia. Nestas condições, estes planetas possuem ambientes inapropriados para a existência de vida.

- O planeta c é o único que poderia desenvolver um ambiente propício à vida. Sua temperatura de equilíbrio é $T_{eq} = 243$ K e o efeito estufa pode aumentar tal valor até 290 K, suficiente para manter a água no estado líquido. Por outro lado, a pressão parcial do CO_2 atmosférico é controlada pelo ciclo do carbono via reações de Urey, que garantem a estabilidade do clima. Supondo-se um estado de equilíbrio entre os mecanismos de produção, captura e/ou de fixação do carbono [vide Eq. (1)], temos uma relação adicional entre a pressão parcial do CO_2 e a temperatura da superfície, como mostrado na Figura 4.

No cálculo da variação da temperatura devida ao efeito estufa, como mencionado antes, foram utilizados o modelo simples de atmosfera em equilíbrio radiativo, adotando-se um albedo $A = 0,35$ (curva em bordô na Figura 3). Para o modelo radiativo-convectivo (curva em laranja na Figura 3) foi considerado um fluxo de evapotranspiração igual a $H = 40$ W/m². Na Terra, tal fluxo é estimado como sendo da ordem de 77-80 W/m². A coluna média de água precipitável é aproximadamente 2,5 kg/m², cerca de uma ordem de grandeza inferior ao valor terrestre. Isto se explica pelo fato que a pressão atmosférica em GJ 667C c foi estimada em cerca de 12 vezes a pressão da atmosfera da Terra, o que reduz a taxa de evaporação.

Para o cálculo do ciclo do carbono foram usadas as expressões das Refs. [10, 14] para o intemperismo continental e oceânico respectivamente. A taxa de produção do CO_2 no planeta c foi

estimada redimensionando a taxa terrestre pela razão das superfícies, no que resulta $V = 665$ Mt/ano. Três valores para a superfície oceânica foram considerados: 70%, isto é, um planeta similar à Terra, um caso intermediário (50%) e um caso de uma grande massa continental, correspondendo a uma cobertura oceânica de apenas 30%. É preciso salientar-se que os cálculos acima correspondem a um planeta abiótico. Se a vida eventualmente emergiu no planeta c devido as condições favoráveis, a presença de uma eventual vegetação vai certamente aumentar a fixação do CO_2 no solo que, no caso da Terra, pode produzir uma concentração cerca de 10-100 vezes maior que à da atmosfera [26]. Isto implica que a vegetação acelera o intemperismo, diminuindo a temperatura da superfície e a pressão parcial do CO_2 atmosférico.

A interseção das curvas do ciclo do carbonossilicato com as do efeito estufa definem condições de equilíbrio do clima e três situações básicas podem ocorrer [27]: 1) as curvas do efeito estufa e do intemperismo se cruzam acima do ponto de congelamento. Esta situação é estável e a água permanece no estado líquido (caso do planeta c); 2) a curva do efeito estufa é incapaz de ultrapassar o ponto de congelamento e um estado de glaciação se estabelece (caso dos planetas f, e, g); 3) a curva do efeito estufa e do ciclo do carbonossilicato se cruzam abaixo mas nas vizinhanças do ponto de congelamento. Esta situação é instável e períodos de glaciação se alternam com períodos nos quais a água existe na forma líquida, graças a ciclos de temperatura ligeiramente abaixo e acima do ponto de congelamento. A habitabilidade nestas condições é controversa e uma discussão desta questão pode ser encontrada na Ref. [12], ou Ref. [28].

Na Tabela 3 estão resumidas as condições climáticas esperadas para GJ 667C c. Notar que em todos os casos a pressão atmosférica é idêntica e igual a 12,1 bar, conforme a relação de redimensionamento discutida anteriormente. Notar que a gravidade neste planeta é cerca de duas vezes o valor terrestre, implicando em uma escala de altura para a atmosfera de apenas 4,3 km.

Os valores mostrados na Tabela 3 indicam que o clima de GJ667C c é similar ao terrestre, embora mais frio e muito mais seco, como mencionado anteriormente. Deve-se mencionar que as soluções para o modelo R-C implicam em tempe-

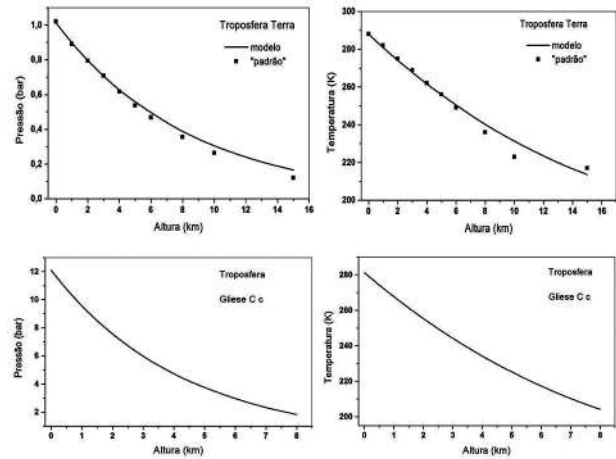


Figura 3: Na parte superior da figura são mostrados os perfis calculados com o modelo R-C para a pressão e para a temperatura da Troposfera terrestre. Os quadrados indicam valores médios do modelo padrão para a atmosfera da Terra. Na parte inferior, os mesmos perfis calculados para a Troposfera de GlieseC c.

raturas mais baixas e pressões parciais de CO_2 mais elevadas, o que parece contrariar o esperado pelo efeito estufa. No entanto, a eficiência do sequestro do CO_2 atmosférico pelo intemperismo associado ao ciclo do carbonossilicato decresce com a temperatura, resultando em uma pressão parcial do CO_2 mais elevada em condições de equilíbrio, explicando o aparente paradoxo.

5 Conclusões

O objetivo deste curto artigo é esclarecer o significado de “habitabilidade” de um planeta bem como o da chamada “zona de habitabilidade” de um sistema planetário. De forma geral, a habitabilidade de um planeta está relacionada com a presença de água líquida na sua superfície durante escalas de tempo geológicas [29]. Esta condição é afetada por diferentes fatores que, entre outros, podemos mencionar: 1) o tipo da estrela central e o período orbital, que condicionam a irradiação recebida pelo planeta; 2) a rotação e a inclinação do seu eixo, que afetam a redistribuição da energia recebida e, finalmente, 3) a presença de uma atmosfera. A pressão atmosférica é um fator preponderante na determinação do estado termodinâmico da água na superfície, enquanto que sua circulação longitudinal e meridional, bem como a presença de gases responsáveis pelo efeito estufa são fundamentais na ca-

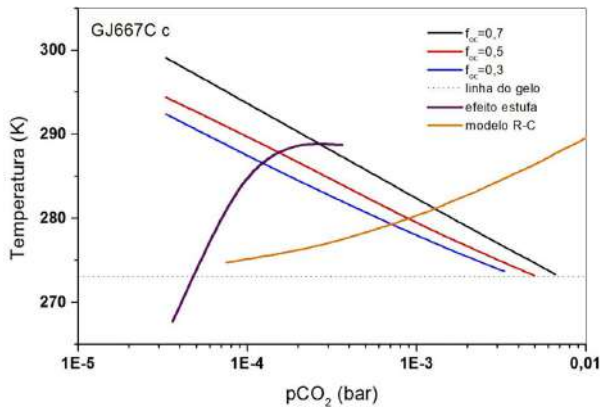


Figura 4: Clima de GJ 667C c – as curvas em negro, vermelho e azul mostram a variação da temperatura com a pressão parcial do CO_2 devido ao ciclo do carbono-silicato, para diferentes valores da fração oceânica que cobre a superfície do planeta. As curvas em bordô (modelo radiativo) e em laranja (modelo radiativo-convectivo) mostram a mesma variação devido ao efeito estufa. A linha horizontal pontilhada indica a temperatura de congelamento da água.

racterização do clima. Planetas com temperaturas médias superiores a 355 K dificilmente desenvolverão formas de vida [18]. A estabilidade do clima em escalas geológicas é garantida pelo ciclo do carbono-silicato, desde que o planeta possua uma atividade tectônica. Esta representa uma fonte importante de CO_2 através de processos de desgaseificação em falhas da crosta e de vulcanismo, enquanto a subducção transporta para o manto interno rochas que sofreram intemperismo e que consomem o CO_2 da atmosfera via reações de Urey [30, 31].

Nestas condições, a chamada “zona habitável” de um dado sistema planetário é determinada em função de um modelo climático. A zona interna corresponde a uma atmosfera onde os gases do efeito estufa conduzem a um embalamento da temperatura e a consequente perda da água do planeta. Por outro lado, além da zona externa, a água se congela independentemente da concentração dos gases do efeito estufa [32]. Outras abordagens são possíveis como aquela adotada na Ref. [15], onde o efeito estufa na zona interna é dominado pelo vapor de água e pelo CO_2 na zona externa.

Neste artigo foram consideradas atmosferas secundárias dominadas pelo N_2 , sendo o CO_2 uma componente residual. Modelos 1-D de atmosferas, como os descritos neste artigo, permitem calcular a distribuição vertical da temperatura na Troposfera, que depende da pressão na superfície,

da aceleração gravitacional do planeta, da radiação estelar incidente e do albedo total (atmosfera + solo) do planeta. Modelos incluindo processos convectivos e fluxos de evapotranspiração são mais realistas, enquanto que a estabilidade do clima resultante depende do ciclo do carbono-silicato, modelizado aqui pela abordagem simples das Refs. [11, 14].

Os modelos climáticos aqui considerados foram aplicados ao sistema planetário presente em torno da estrela Gliese 667C, constituído por 5 planetas rochosos do tipo “super-Terra”. Uma estimativa da linha de água do disco protoplanetário permite afirmar que, mesmo sem uma migração inicial importante, os planetas c, f, e, g devem possuir um manto com minerais hidratados contendo uma porcentagem em água, da ordem de 4,7% em massa. Isto é suficiente para que a camada acima do magma produza oceanos na superfície do planeta através da subducção de placas, seguida de processos de desgaseificação e vulcanismo. O planeta b, o mais próximo atualmente da estrela central, se não migrou de forma significativa, deve ter sido formado aquém da linha de água e provavelmente deve possuir um manto pobre em minerais hidratados, privando o planeta de uma fonte importante de água. Some-se as temperaturas elevadas esperadas devido sua proximidade da estrela, é provável que este planeta não tenha condições favoráveis a emergência e ao desenvolvimento da vida. Por outro lado, o efeito estufa é incapaz de elevar a temperatura dos planetas f, e, g acima do ponto de congelamento e estes planetas devem possuir uma superfície permanentemente congelada, imprópria para a vida.

O planeta c é uma exceção. O efeito estufa pode elevar a temperatura o suficiente para manter a água no estado líquido na superfície e o ciclo do carbono-silicatos garante a estabilidade do clima, condição necessária para que a vida se desenvolva. A presença de vida neste planeta pode alterar o clima, seja modificando a composição química da atmosfera, seja alterando o intemperismo, pois a presença de uma vegetação aumenta a concentração do CO_2 no solo, mas estas questões fogem aos objetivos do presente artigo.

Futuras observações com o telescópio especial James Webb poderão colocar em evidência a presença (ou não) de atmosferas nestas “super-Terras”, bem como apresentar indícios concretos sobre a habitabilidade destes mundos.

Sobre o autor

José Antônio de Freitas Pacheco (pacheco@oca.eu) é Professor Emérito do Observatoire de la Côte d'Azur (OCA), na França. Formado na Universidade de São Paulo (USP), foi diretor do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP, do Observatório Nacional, e do próprio OCA. Membro da Academia Brasileira de Ciências, foi agraciado com a medalha do Mérito Científico do Governo Brasileiro. Possui mais de 200 artigos científicos publicados, tendo sido orientador de mais de 20 doutorandos, tanto no Brasil quanto na Europa. Autor do livro *Vida no Universo*, publicado pela EDUSP.

Referências

- [1] N. R. Pace, *The universal nature of biochemistry*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **98**(3), 805 (2001).
- [2] T. Shi et al., *Characterization of viable bacteria from siberian permafrost by 16S rDNA sequencing*, *Microb. Ecol.* **33**(3), 169 (1997).
- [3] R. J. Cano e M. K. Borucki, *Revival and identification of bacterial spores in 25- to 40-million-year-old dominican amber*, *Science* **268**(5213), 1060 (1995).
- [4] R. Pascal, *Suitable energetic conditions for dynamic chemical complexity and the living state*, *J. Syst. Chem.* **3**(1), 3 (2012).
- [5] K. I. Cunningham et al., *Bacteria, fungi and biokarst in lechuguilla cave, carlsbad caverns national park, new mexico*, *Environ. Geol.* **25**(1), 2 (1995).
- [6] R. Cavicchioli, *Extremophiles and the search for extraterrestrial life*, *Astrobiology* **2**(3), 281 (2002).
- [7] C. T. Unterborn et al., *Inward migration of the TRAPPIST-1 planets as inferred from their water-rich compositions*, *Nat. Astron.* **2**(4), 297 (2018).
- [8] G. A. L. Coleman et al., *Pebbles versus planetesimals: the case of Trappist-1*, *Astron. Astrophys.* **631**, A7 (2019).
- [9] F. Masset e M. Snellgrove, *Reversing type II migration: resonance trapping of a lighter giant protoplanet*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **320**(4), L55 (2001).
- [10] B. J. Foley, *The role of plate tectonic-climate coupling and exposed land area in the development of habitable climates on rocky planets*, *The Astrophysical Journal* **812**(1), 36 (2015).
- [11] K. Menou, *Climate stability of habitable Earth-like planets*, *Earth Planet. Sci. Lett.* **429**, 20 (2015).
- [12] J. Haqq-Misra et al., *Limit cycles can reduce the width of the habitable zone*, *Astrophys. J.* **827**(2), 120 (2016).
- [13] T. Gerlach, *Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide*, *Eos, Transactions American Geophysical Union* **92**(24), 201 (2011).
- [14] R. A. Berner, *GEOCARB II; a revised model of atmospheric CO₂ over phanerozoic time*, *Am. J. Sci.* **294**(1), 56 (1994).
- [15] R. K. Kopparapu et al., *Habitable zones around main-sequence stars: Dependence on planetary mass*, *Astrophys. J. Lett.* **787**(2), L29 (2014).
- [16] R. kumar Kopparapu et al., *Habitable moist atmospheres on terrestrial planets near the inner edge of the habitable zone around m dwarfs*, *The Astrophysical Journal* **845**(1), 5 (2017).
- [17] A. D. D. Genio et al., *Albedos, equilibrium temperatures, and surface temperatures of habitable planets*, *The Astrophysical Journal* **884**(1), 75 (2019).
- [18] E. T. Wolf et al., *Constraints on climate and habitability for Earth-like exoplanets determined from a general circulation model*, *The Astrophysical Journal* **837**(2), 107 (2017).
- [19] J. A. de Freitas Pacheco, *Vida no Universo* (EDUSP, São Paulo, 2020).
- [20] E. Agol et al., *Refining the transit-timing and photometric analysis of TRAPPIST-1: Masses, radii, densities, dynamics, and*

- ephemerides*, *The Planetary Science Journal* **2**(1), 1 (2021).
- [21] G. Anglada-Escudé et al., *A dynamically-packed planetary system around GJ 667C with three super-earths in its habitable zone*, *Astron. Astrophys.* **556**, A126 (2013).
- [22] M. A. Thompson et al., *Composition of terrestrial exoplanet atmospheres from meteorite outgassing experiments*, *Nat. Astron.* **5**(6), 575 (2021).
- [23] A. Tsuchiyama et al., *Discovery of primitive CO₂-bearing fluid in an aqueously altered carbonaceous chondrite*, *Sci. Adv.* **7**(17) (2021).
- [24] E. W. Schwieterman et al., *A limited habitable zone for complex life*, *The Astrophysical Journal* **878**(1), 19 (2019).
- [25] D. S. Abbot, N. B. Cowan e F. J. Ciesla, *Indication of insensitivity of planetary weathering behavior and habitable zone to surface land fraction*, *The Astrophysical Journal* **756**(2), 178 (2012).
- [26] L. R. Kump, J. F. Kasting e R. G. Crane, *The Earth system: Pearson new international edition* (Pearson Education, Londres, 2013), 3^a ed.
- [27] N. E. Batalha et al., *Climate cycling on early Mars caused by the carbonate-silicate cycle*, *Earth Planet. Sci. Lett.* **455**, 7 (2016).
- [28] A. Paradise et al., *Habitable snowballs: Temperate land conditions, liquid water, and implications for CO₂ weathering*, *J. Geophys. Res. Planets* **124**(8), 2087 (2019).
- [29] M. H. Hart, *Habitable zones about Main Sequence Stars*, *Icarus* **37**(1), 351 (1979).
- [30] G. Gonzalez, *The galactic habitable zone: Galactic chemical evolution*, *Icarus* **152**(1), 185 (2001).
- [31] J. F. Kasting e D. Catling, *Evolution of a habitable planet*, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **41**(1), 429 (2003).
- [32] J. F. Kasting, D. P. Whitmire e R. T. Reynolds, *Habitable zones around Main Sequence Stars*, *Icarus* **101**(1), 108 (1993).

Impacto da atividade das estrelas na habitabilidade de exoplanetas

Adriana Valio

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Resumo

O Sol e as estrelas apresentam atividade magnética na forma de manchas escuras em sua superfície, além de produzirem explosões e ejeções de massa de suas atmosferas. As assinaturas de manchas escuras na superfície das estrelas podem ser modeladas a fim de caracterizar seus tamanhos e temperaturas. Estrelas jovens e anãs M produzem energéticas superexplosões, as quais podem impactar os planetas em órbitas, principalmente os que estiverem bem próximos da sua estrela hospedeira. O fluxo de radiação ultravioleta destas explosões pode ser prejudicial para possíveis organismos vivos na superfície de exoplanetas orbitando na zona habitável de estrelas ativas. Entretanto, uma atmosfera com ozônio poderia protegê-los, ou então um oceano. Os ventos estelares também afetam as atmosferas planetárias, podendo ser responsáveis pela sua erosão.

Abstract

The Sun as well as the stars exhibit magnetic activity in the form of dark spots on their surface, in addition they also produce flares and mass ejections from their atmospheres. The signatures of dark spots on the surface of stars can be modeled so as to characterize their sizes and temperatures. Young and M dwarf stars produce energetic superflares, which can impact orbiting planets, especially those very close to their host star. The flux of ultraviolet radiation from these flares can be very harmful to potential organisms living on the surface of exoplanets orbiting in the habitable zone of active stars. However, an atmosphere with ozone could protect them, or perhaps an ocean. Winds also affect the planetary atmospheres and may be responsible for their erosion.

Palavras-chave: atividade solar, atividade estelar,, manchas explosões estelares, exoplanetas, habitabilidade planetária.

Keywords: solar activity, stellar activity, spots, stellar flares, exoplanets, planetary habitability.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38943](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38943)

1 Introdução

Há mais de 4 séculos que o Sol, a estrela mais próxima da Terra, vem sendo monitorada. Inicialmente por telescópios rudimentares no solo, os quais possibilitaram a observação sistemática das manchas solares, e atualmente por uma pletera de missões espaciais. Embora nem seja considerado uma estrela ativa quando comparado às outras estrelas, a atividade solar como as explosões e ejeções de massa têm significativo impacto no nosso planeta, principalmente nos dispositivos de comunicação e satélites.

Entretanto, no passado há alguns bilhões de anos, os efeitos da atividade de um jovem Sol bem mais ativo podem ter sido muito mais danosos para os planetas terrestres do Sistema Solar. Radiação ultravioleta de superexplosões podem ter

impossibilitado a vida na superfície do planeta, restringindo-a aos oceanos e lagos numa época em que a camada de ozônio terrestre ainda não tinha se formado. Por outro lado, um forte vento solar pode ter varrido as atmosferas primordiais de Mercúrio e Marte.

Embora a existência de água líquida na superfície de planetas rochosos seja uma prerrogativa para a existência da vida, como a conhecemos na Terra, certamente a atividade estelar tem um papel restritivo na origem e manutenção da vida em planetas em torno de estrelas ativas. As estrelas mais ativas são as jovens com menos de 1 a 2 bilhões de anos e as completamente convectivas como as pequenas estrelas anãs vermelhas. Não obstante, a zona habitável de uma estrela de baixa massa, devido ao seu fraco brilho, é muito mais interna e bem próxima da estrela. Logo,

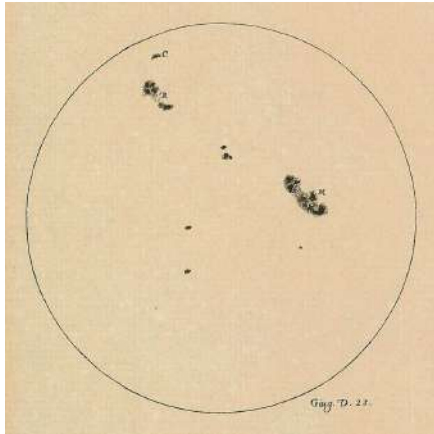


Figura 1: Desenho original de manchas solares feito por Galileo Galilei. Créditos: Projeto Galileo.

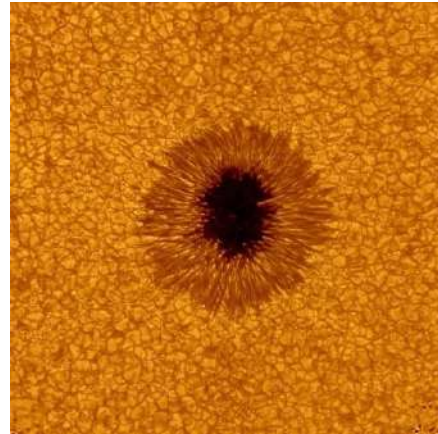


Figura 2: Foto de uma mancha solar tirada em 1º de julho de 2010 pelo New Solar Telescope do Observatório Solar de Big Bear (Califórnia, EUA).

planetas rochosos que venham a existir nesta região próxima da estrela, mesmo que a temperatura seja amena para a existência da água líquida, os fortes ventos estelares podem não permitir a retenção de uma atmosfera e suas superexplosões produzirem radiação UV esterilizante.

Como o Sol é o laboratório de onde obtemos nosso conhecimento sobre atividade estelar, na Seção 2 apresentamos os fenômenos característicos da atividade solar como manchas, explosões e ejeções de massa coronal, assim como o vento solar. A atividade das estrelas é detalhada na Seção 3, especificamente suas manchas, explosões e ventos. Exoplanetas e o conceito de habitabilidade planetária são explicados na Seção 4, enquanto o impacto da atividade estelar, principalmente das superexplosões, é descrito na Seção 5. Finalmente a Seção 6 conclui o artigo.

2 Atividade do Sol

O Sol, embora considerado calmo para os padrões estelares, apresenta atividade na forma de manchas escuras em sua superfície, explosões e ejeções de massa que atrapalham a sociedade tecnológica aqui na Terra interferindo nos sinais de telefonia celular e GPS, entre outros. Toda esta atividade solar tem origem em campos magnéticos produzidos no seu interior. O vento solar, constituído de partículas da atmosfera solar, preenche todo o Sistema Solar até encontrar os ventos das estrelas vizinhas. Maiores detalhes sobre o Sol como um todo podem ser encontrados no livro de divulgação de Adriana Silva [1].

2.1 Manchas solares e seu ciclo

Nosso Sol vem sendo estudado há vários séculos. Chineses e outros povos antigos já relatavam a presença de manchas no Sol a olho nu [2]. Entretanto, foi no início do século XVII que teve início o monitoramento sistemático das manchas solares com Galileo e Scheiner entre outros com o auxílio de lunetas e telescópios [3]. Um exemplo do detalhamento dos estudos das manchas solares feito por Galileo Galilei é mostrado na Figura 1.

Hoje sabemos que as manchas solares são regiões mais frias (4.000–4.500 K) que a fotosfera (5.780 K) ao redor. Estas regiões são mais frias por causa da concentração de intensos campos magnéticos que há nelas [4]. O campo magnético atrapalha o transporte de calor das partes mais internas do Sol para a sua superfície (fotosfera). Uma imagem atual de uma mancha solar pode ser vista na Figura 2. A região central mais escura, onde o campo magnético é mais intenso (de centenas até alguns milhares de Gauss), é chamada de *umbra* enquanto a região ao redor é a *penumbra*. As manchas solares são os “pés” dos arcos magnéticos que perfuram a superfície solar. Estes arcos são vistos em imagens de ultravioleta e raio X do Sol (Figura 3).

Em 1843, Schwabe, um astrônomo amador alemão, descobriu que o número de manchas na superfície do Sol variava com uma periodicidade de aproximadamente 11 anos, conhecido atualmente como o ciclo de atividade do Sol [5]. Em períodos de máxima atividade centenas de manchas podem ser observadas no Sol, enquanto durante dias de mínima atividade nenhuma mancha é vista (Fi-

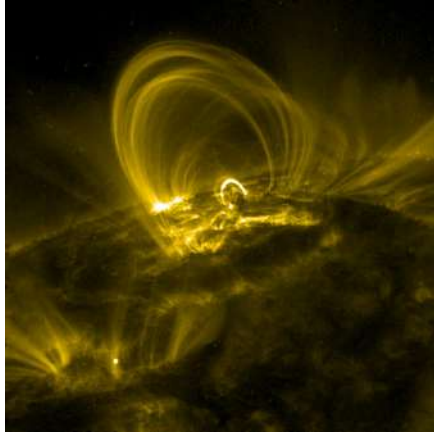


Figura 3: Foto de arcos magnéticos observados pelo satélite Transition Region and Coronal Explorer (TRACE), na linha de ultravioleta de 171 Å. Estes arcos têm temperaturas de aproximadamente 10^6 K.

gura 4).

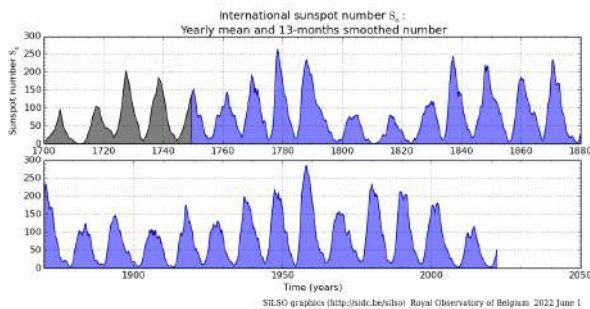


Figura 4: Média anual do número de manchas solares.

2.2 Explosões e ejeções de massa

As explosões solares estão entre os fenômenos mais energéticos do Sistema Solar, embora durem de alguns minutos a uma hora. Quando os arcos magnéticos, como os da Figura 3 se reconectam ou alteram a sua configuração, uma fração da sua energia magnética é liberada. Esta energia é suficiente para em questão de fração de segundo acelerar partículas até energias muito altas e também aquecer o plasma da atmosfera solar. Tanto as partículas energéticas quanto o plasma quente (milhões de graus) emitem radiação em todo o espectro eletromagnético de raios X até ondas de rádio, passando pelo ultravioleta, visível e infravermelho. As explosões mais intensas chegam a emitir até 10^{32} ergs [6].

Às vezes as explosões vêm acompanhadas da ejeção de enormes quantidade de matéria da atmosfera solar para o meio interplanetário, como foi o caso da explosão da Figura 5. Estas são

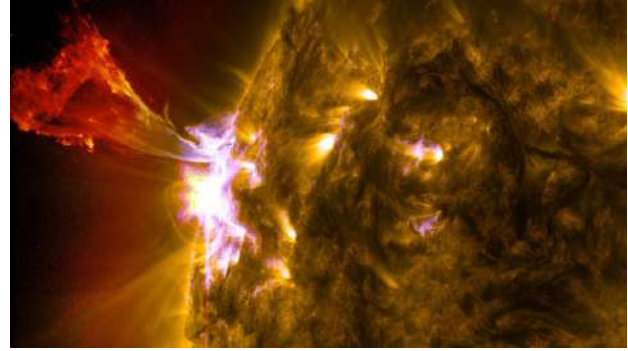


Figura 5: Explosão solar observada pelo satélite Solar Dynamics Observatory, da NASA, em 28 de outubro de 2021.

conhecidas como “ejeções de massa coronal” [7]. A coroa, camada mais externa do Sol, é muito quente com temperatura de milhões de graus. Em média, 10^{12} kg de plasma solar é arremessado, entrelaçado por campos magnéticos. As maiores ejeções de massa também são tão energéticas quanto as explosões mais intensas. Entretanto, as ejeções de massa também podem acontecer sem que tenha havido uma explosão. Mas a fonte de energia destas também é de origem magnética.

Ocasionalmente, algumas das ejeções são direcionadas para a Terra. Quando toda esta matéria que foi ejetada alcança o nosso planeta alguns dias depois, vários são os distúrbios causados. Por exemplo, fortes tempestades geomagnéticas que alteram o campo magnético terrestre causando o comportamento errático de instrumentos de navegação como bússolas; alterações na ionosfera as quais afetam as comunicações de longa distância; curto circuitos em satélites picos de correntes nas linhas de alta tensão; apagões; alterações na camada de ozônio, entre outros. Também podem alterar as órbitas dos satélites e interferir no do sinal de GPS. As lindas auroras boreais (hemisfério Norte) e austrais (hemisfério Sul) também são produzidas quando as partículas ionizantes das ejeções penetram na nossa atmosfera. Felizmente o campo magnético do nosso planeta nos protege da maior parte das partículas ionizadas destas ejeções de massa. Contudo a radiação das explosões pode ser letal para astronautas desprotegidos.

2.3 Vento solar

A coroa, última camada da atmosfera solar, por se encontrar a temperaturas tão altas, emana um fluxo contínuo de partículas conhecido como

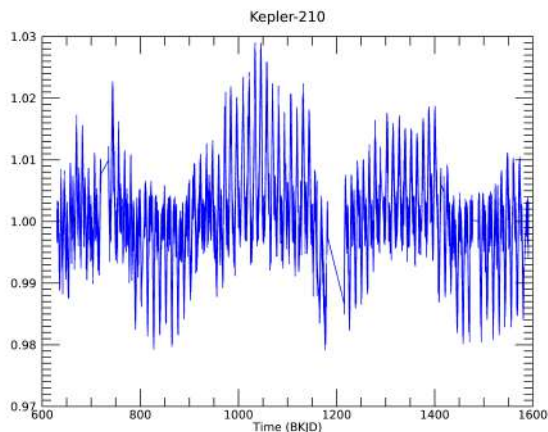


Figura 6: Curva de luz da estrela Kepler-210 observada pela missão espacial Kepler da NASA.

o vento solar. O vento solar permeia toda a heliosfera, a bolha de material solar permeada pelo campo magnético solar, que inclui todo o Sistema Solar. Trabalhos recentes mostraram que a heliosfera tem o formato de um croissant [8].

Em 1959, Parker foi o primeiro a descrever matematicamente a dinâmica do vento solar [9]. Atualmente sabe-se que toda a atividade solar é gerada por um campo criado no seu interior por um mecanismo de dínamo (o $\alpha\Omega$ dínamo), proposto pela primeira vez por Parker [10].

No caso do nosso Sol, por ser uma estrela de meia idade, o vento solar atual não causa danos à nossa atmosfera, mas este pode não ser o caso para planetas muito mais próximos de suas estrelas. E certamente não é o caso de estrelas bem mais jovens que possuem um vento bem mais intenso.

3 Atividade estelar

Assim como o nosso Sol, a atividade das estrelas se manifesta na forma de manchas e explosões. Esta atividade provém do campo magnético estelar. Embora a atividade solar muitas vezes tenha impacto em nosso planeta Terra, de um modo geral, nossa estrela é tida como inativa quando comparada às estrelas ativas. Toda esta atividade das estrelas ativas, juntamente com o vento estelar, podem afetar a atmosfera dos exoplanetas até causando sua evaporação e/ou erosão. Além disso, o fluxo aumentado de radiação ultravioleta durante as intensas explosões estelares podem in-

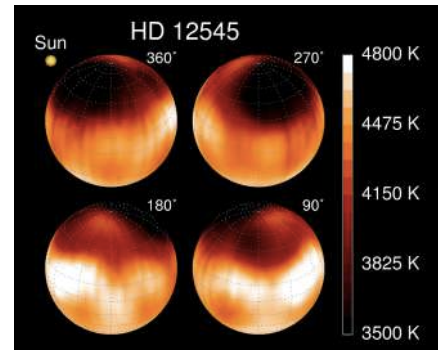


Figura 7: Mapa de temperatura da superfície reconstruído a partir da técnica de imageamento Doppler [12].

viabilizar a vida na superfície dos planetas em órbita, mesmo em sua zona habitável.

3.1 Manchas estelares

Muito provavelmente, todas as estrelas frias com um envelope convectivo como o Sol têm manchas suas superfícies. A principal característica de uma estrela ativa é a presença de muitas manchas escuras em sua superfície. Estas manchas chegam a causar variações de alguns porcentos no brilho total da estrela ao longo de dias. No caso da estrela do tipo espectral K, Kepler-210, observada pelo satélite Kepler, a variação do brilho total da estrela chega a $\pm 2\%$ (Figura 6), enquanto que as manchas solares sequer causam variações de 0,1%. A evidente periodicidade do brilho da estrela é causada pela rotação da estrela conforme manchas escuras entram e saem da nossa visão. Portanto, o período de rotação da estrela é facilmente estimado, no caso da Kepler-210, este período é de 12,35 dias.

Os telescópios atuais não possuem resolução espacial para detectar manchas individuais semelhantes às manchas solares. No entanto, existem basicamente três métodos para identificar e caracterizar as manchas estelares: (1) imageamento Doppler, (2) modulação fotométrica e (3) mapeamento por trânsito planetário.

O imageamento Doppler usa as deformações observadas nos perfis de linhas espectrais causadas pela rotação da estrela para recuperar a distribuição de temperatura da superfície estelar [11]. Porém, o método de imageamento Doppler só pode ser aplicado em estrelas com rápida rotação. Um exemplo da distribuição da temperatura na superfície da estrela gigante K0 HD 12545 é mostrada na Figura 7 [12].

Como mencionado anteriormente, a rotação da

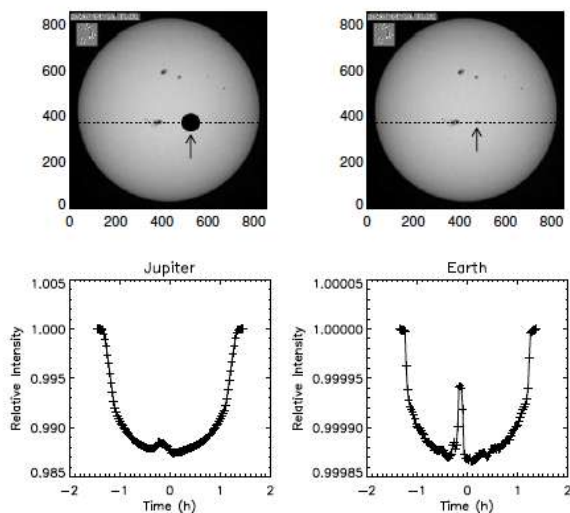


Figura 8: Imagem do Sol com a simulação de trânsito de um planeta do tamanho de Júpiter (esquerda) e da Terra (direita) em frente a uma mancha solar. [15].

estrela induzirá variações periódicas em seu brilho total, exemplificado na Figura 6. Esta modulação fotométrica da curva de luz pode ser ajustada por modelos para inferir as características dessas manchas [13, 14]. Este modelo é conhecido como o Modelo da Máxima Entropia, onde a superfície da estrela é dividida em um número fixo de pixels [14]. Em um dado instante, a cada pixel é atribuída uma certa intensidade (mais escura para manchas e mais brilhante para *faculae*) de forma que o brilho total naquele instante seja ajustado.

O último dos três métodos, mapeamento de manchas por trânsito planetário, foi idealizado por mim em 2003 [16] e aplicado pela primeira vez à estrela HD 102458. Quando um planeta transita na frente de sua estrela hospedeira, há uma chance de que ele oculte uma ou mais manchas na superfície da estrela. O resultado é uma pequena variação durante a curva de luz de trânsito, a qual depende das características da mancha como tamanho e intensidade.

Na Figura 8 é mostrado uma simulação do sinal causado pela mesma mancha, de uma imagem real do Sol, ocultada pelo trânsito de um planeta do tamanho de Júpiter (esquerda) e da Terra (direita) [15]. Notem que o trânsito de um planeta como Júpiter causa uma diminuição de 1% no brilho total da estrela, enquanto que o trânsito de uma Terra, 10 vezes menor, causa uma diminuição de apenas 0,01%. Porém no caso da Terra, o sinal da mancha é relativamente bem mais evi-

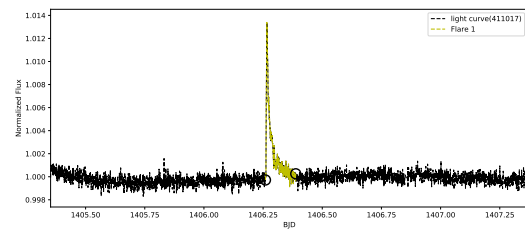


Figura 9: Maior *superflare* observada na curva de luz da estrela Kepler-411, do tipo espectral K [18].

dente. A partir da modelagem das assinaturas das manchas nas curvas de luz de trânsitos é possível estimar seu tamanho, temperatura e até intensidade do campo magnético [17, 18].

3.2 Explosões

Outra manifestação da atividade estelar são as explosões, ou *flares* em inglês, súbitos aumentos de brilho que também podem chegar a alguns por cento do brilho da estrela, porém em questão de minutos. Geralmente são bem mais energéticas que as contrapartidas solares, chegando a emitir de 1.000 a 10.000 vezes mais energia que as explosões do Sol e, portanto, também são conhecidas como *superflares*.

O satélite Kepler (NASA) monitorou continuamente mais de 160.000 estrelas [19]. Os aumentos repentinos observados no brilho de uma estrela indicam a ocorrência de uma explosão, como mostrado na Figura 9. Essas superexplosões liberam quantidades significativas de raios X, radiação ultravioleta extremo (EUV) e ultravioleta (UV).

Na Ref. [20], os autores detectaram 365 superexplosões em 9.751 estrelas do tipo solar. Essas explosões atingiram energias de 10^{35} ergs em 148 estrelas. Estrelas anãs M do tipo tardio têm uma frequência de explosões 1.000 vezes maior que a do Sol. Dependendo da energia da explosão, podem ocorrer mudanças na atmosfera planetária, como perda atmosférica por foto-evaporação e também alteração da composição química da alta atmosfera. Além disso, os prótons energéticos das explosões podem produzir nitrogênio ímpar e hidrogênio ímpar na camada superior da atmosfera e mesosfera. Estes elementos podem destruir o ozônio, o que afeta a origem e a evolução da vida [21].

3.3 Ventos

Ventos estelares podem causar erosão da atmosfera dos planetas em órbita, caso estes não tenham um campo magnético protetor. Acredita-se que isso tenha acontecido com Marte no passado, quando existia água corrente em sua superfície, provavelmente mantida por um atmosfera que mais tarde foi perdida.

As ejeções de massa coronal também contribuem para a perda de uma atmosfera planetária. Embora até o momento nenhuma ejeção de massa de uma estrela foi observada.

Na Ref. [22] investigaram-se as interações entre o vento estelar de uma típica estrela M e a atmosfera superior, rica em hidrogênio, de um planeta semelhante à Terra e de uma super-Terra na zona habitável (aproximadamente 0,24 UA). A formação e evolução de uma extensa atmosfera foi estudada dependendo da radiação X e UV a estrela, das características do vento estelar, como densidade e velocidade, e se o planeta tinha ou não uma magnetosfera. De acordo com os autores, o escape não térmico de átomos de hidrogênio ionizados arrastados ao longo da vida de um planeta varia entre 0,4 quantidades equivalentes de hidrogênio no oceano da Terra e geralmente é várias vezes menor que o escape atmosférico térmico.

A atividade em estrelas do tipo solar depende da rotação da estrela. Mas a rotação diminui com a idade da estrela devido à perda de momento angular causada pelo vento estelar ao longo do tempo de vida na sequência principal [23]. Em estrelas do tipo solar, a relação idade-atividade é bem definida, com estrelas jovens tendo forte emissão nas linhas H e K do CaII cujo fluxo é proporcional a $t^{-1/2}$, onde t é a idade da estrela. Essa frenagem atua até cerca de 2 bilhões de anos [24]. Uma relação idade-atividade semelhante a de Skumanich também é encontrada para estrelas gêmeas solares [25].

4 Exoplanetas e habitabilidade

Atualmente já são mais de 5.000 exoplanetas (planetas em torno de outra estrela que não o Sol) descobertos pelos mais variados métodos de detecção, sendo o método do trânsito o mais prolífico (70%) graças ao satélite Kepler.¹ Acredita-se que em torno de cada uma das estrelas da Via

Láctea existe pelo menos um planeta, mais provavelmente múltiplos planetas.

Uma das mais importantes descobertas da missão espacial Kepler foi que a maioria dos exoplanetas não se parece em nada com planetas do nosso Sistema Solar. Mais da metade dos planetas, cujo raio é conhecido (basicamente pelo método de trânsito), são do tipo Super-Terra ou Mini-Netuno, planetas com raios entre 1,5 e 3 raios terrestres. As Super-Terras são planetas rochosos e em princípio capazes de abrigar vida em sua superfície se localizadas na Zona Habitável de sua estrela. Já os Mini-Netunos são mais parecidos com os gigantes de gelo do nosso Sistema Solar, com uma atmosfera espessa de hidrogênio e hélio.

A Zona Habitável (HZ) de uma estrela é a região onde a temperatura da superfície de um planeta terrestre seria entre 0°C e 100°C, isto é, capaz de reter água líquida. Claro a presença e o tipo de atmosfera que o planeta possua influencia a existência de água no estado líquido na superfície. Esta região depende do brilho da estrela, responsável principal pela temperatura do planeta, e, portanto, da sua massa. No caso do Sol, a ZH varia entre 0,95 e 1,37 UA, colocando a Terra confortavelmente dentro da zona habitável da nossa estrela.

Entretanto, as estrelas mais comuns na nossa Galáxia são as anãs M, com massas entre 0,6 e 0,08 massas solares, e brilho entre 7% e 0,03% do nosso Sol. Isto significa que a ZH destas estrelas se encontra muito próxima destas. Por exemplo, a estrela fria TRAPPIST-1 com massa de apenas 9% da massa do Sol possui 7 planetas terrestres em órbita. Dada a sua baixa massa, a ZH ao seu redor se encontra entre 0,02 e 0,05 UA, isto é, bem mais interna até que a órbita do planeta Mercúrio (0,387 UA). Mesmo assim, 3 dos planetas TRAPPIST-e, TRAPPIST-f e TRAPPIST-g se encontram na Zona Habitável da estrela. Por estarem tão próximos de sua estrela, estes planetas estão sujeitos a toda sorte de perigos provenientes da atividade estelar. E estrelas completamente convectivas como as anãs M frias são extremamente ativas.

Quando a radiação e as partículas produzidas pela atividade solar atingem da Terra, eles podem causar muitos danos à nossa sociedade altamente tecnológica, mas também as altas doses de radiação ultravioleta podem ser fatais para

¹<http://exoplanet.eu>

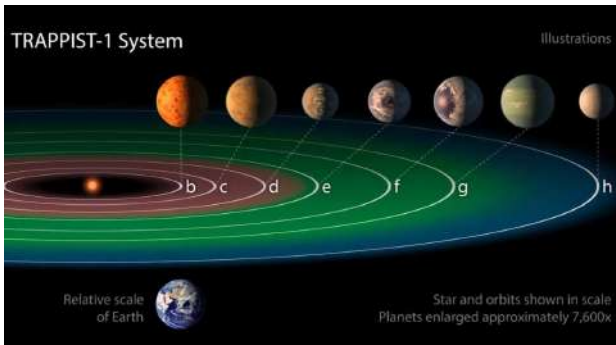


Figura 10: Sistema TRAPPIST-1 com os 7 planetas terrestres. A região verde representa a zona habitável da estrela.

astronautas não protegidos pela nossa atmosfera, principalmente pela camada de ozônio. Da mesma forma, também perigosa para os planetas em órbita é a atividade de sua estrela hospedeira na forma de explosões e ejeções de massa. Além disso, o vento estelar pode impactar severamente a atmosfera de exoplanetas que estão muito próximos da estrela ou não tem magnetosfera, erodindo-a [26].

5 Impacto da atividade estelar

A radiação ultravioleta contínua de estrelas jovens e a produzida repentinamente durante as explosões induzem a foto-evaporação dos gases atmosféricos, portanto, impossibilitando a habitabilidade dos planetas, especialmente aqueles em órbitas próximas. Os ventos estelares também contribuem para a perda de atmosfera de exoplanetas podendo comprometer sua habitabilidade. Também possivelmente fatal para seres vivos na superfície de um planeta é a radiação UV produzida durante explosões.

5.1 Explosões

Com o objetivo de determinar qual o impacto das superexplosões para um possível vida presente na superfície/oceano dos planetas, nós analisamos o efeito da radiação UV de explosões em um planeta hipotético semelhante à Terra orbitando a 1 UA uma estrela como o Sol, Kepler-96 [27], e nos três planetas na zona habitável da estrela TRAPPIST-1 [28].

Kepler-96 é uma estrela semelhante ao Sol, porém com uma idade de 2,2 bilhões de anos que corresponde ao final da Era Arqueana aqui na

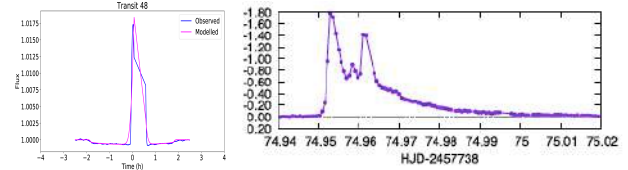


Figura 11: Esquerda: Maior explosão da Kepler-96 observada durante o 48o trânsito da Super-Terra Kepler96b [27]. Direita: Maior explosão da TRAPPIST-1 observada durante a missão K2 [29].

Terra, quando ocorreu o Grande Evento de Oxigenação. Este grande aumento de oxigênio favoreceu o desenvolvimento de organismos multicelulares aqui na Terra. Três superexplosões foram detectadas durante os trânsitos de Kepler-96b, uma Super-Terra muito perto da estrela. A maior destas explosões (painel esquerdo da Figura 11) liberou uma energia de $1,8 \times 10^{35}$ ergs. Dois modelos de atmosfera foram considerados para a Terra hipotética a 1 AU [27]: (1) Arqueana (3,9 Gyr – 2,5 Gyr) com 80% N_2 e 20% CO_2 e (2) Atual, com 80% N_2 e 20% O_2 .

Superflares aumentam o fluxo de UV emitido pela estrela durante um curto período de tempo. Para estimar o fluxo total de UV irradiado durante estas superexplosões, consideramos a mais forte explosão solar já registrada, que ocorreu em 28 de outubro de 2003 [30]. O fluxo UV desta explosão totalizou 12% do fluxo total (4×10^{32} ergs) da explosão solar. Uma simples proporcionalidade entre as explosões solar e da Kepler-96 revela que a superexplosão deve ter aumentado a quantidade de radiação UV que atingiu o planeta hipotético em 5.400% [27].

Se a atmosfera de um planeta tem gases como N_2 , CO_2 , ou O_2 , os comprimentos de onda curtos (0,1–200 nm) da radiação UV são absorvidos no topo da atmosfera. Além disso as radiações UVB e UVC (200–300 nm) serão atenuadas por uma camada de ozônio. No entanto, para um planeta sem uma camada de ozônio, o DNA de um organismo vivo será danificado principalmente pela radiação UVC e UVB. A resposta de um corpo biológico depende do comprimento de onda e da duração de exposição. Portanto, é necessário ponderar o fluxo incidente pelo espectro de ação, uma função que expressa a eficácia da resposta biológica a diferentes comprimentos de onda da radiação.

Consideramos o espectro de ação de duas bactérias: *Escherichia coli* e *Deinococcus radiodurans*.

rans [27]. Esta última uma bactéria extremófila que sobrevive em condições ambientais extremas como vácuo, desidratação e altas dosagens de radiação UV. O resultado do cálculo mostrou que, no caso de uma superexplosão, tanto a *E. coli* quanto a *D. radiodurans* só sobreviveriam na superfície da hipotética Terra em órbita de Kepler-96 se uma camada de ozônio estivesse presente na atmosfera do planeta.

Por outro lado, um oceano de água líquida em um planeta na zona habitável da estrela poderia proteger possíveis organismos vivos do aumento da radiação UV devido às superexplosões, permitindo que a vida prospere. Portanto, analisamos se um oceano poderia preservar os seres vivos da agressividade das superexplosões. A resposta é positiva para profundidades de até 28 m para *E. coli* e apenas 12 m para *D. radiodurans* [27]. Estas profundidades estão dentro da zona fótica (até 200 m) no caso da Terra, onde organismos vivos se proliferam.

O mesmo cálculo foi realizado para os 3 planetas na zona habitável da estrela anã M TRAPPIST-1. Observações mostraram a grande atividade desta estrela, com 47 explosões detectadas em aproximadamente um mês com energias entre 10^{30} e 10^{33} ergs [29]. A maior explosão detectada liberou uma energia total de $1,24 \times 10^{33}$ ergs ao longo de 43 min (painel direito da Figura 11). Para estimar a contribuição do fluxo UV da explosão da TRAPPIST-1 utilizamos o fluxo UV medido para as explosões da estrela Ad Leo, também uma anã vermelha M [31], enquanto o modelo de atmosfera para os planetas foi obtido da Ref. [32]. O resultado foi semelhante ao da hipotética Terra em torno de Kepler-96. Bactérias como *E. coli* e *D. radiodurans* só poderiam sobreviver na superfície dos planetas TRAPPIST-1 na HZ se houvesse uma camada de ozônio presente em suas atmosferas, ou nas águas rasas de um lago ou oceano [28].

5.2 Ventos

A evolução da atmosfera de um planeta depende fortemente das propriedades de sua estrela hospedeira. Estrelas mais jovens produzem ventos mais fortes e intensa emissão de raios X e UV. Planetas que orbitam anãs M são particularmente afetados devido à sua proximidade da estrela hospedeira.

Para determinar se esses planetas em ZH pró-

ximas da estrela conseguem manter uma atmosfera, é necessário quantificar o impacto do vento estelar e dos fluxos de UV ao longo da vida dos planetas.

A perda atmosférica depende da velocidade e densidade do vento e da seção de choque do planeta que varia com seu raio ao quadrado. A velocidade do vento pode ser estimada usando-se a solução da Ref. [9] para o vento a partir da temperatura coronal da estrela. Para o cálculo da diminuição da velocidade do vento com a idade da estrela utilizamos como *proxy* o período de rotação da estrela. A perda de massa devido ao vento estelar foi então calculada em função do tempo, e acumulada até a idade do planeta para determinar o total de perda de massa atmosférica primordial, dominada por H/He.

Já a perda de massa por fotoevaporação é proporcional ao fluxo de UV estelar e inversamente proporcional à densidade do planeta. O fluxo de UV é estimado a partir de observações do fluxo de raio X das estrelas.

Analisando 38 planetas na ZH de estrelas anãs do tipo M descobrimos que o vento estelar só pode remover uma pequena fração do envelope H/He de exoplanetas do tamanho da Terra [33]. Já o cálculo da perda de massa por fotoevaporação causada por um intenso fluxo UV é muito mais efetiva para remover quantidades significativas de H/He. Em torno de um terço dos planetas estudados tiveram sua atmosfera primordial totalmente evaporada pela radiação UV, enquanto que 8% perderam sua atmosfera pelos dois mecanismos (vento e radiação UV). Por outro lado, planetas orbitando a distâncias maiores que 0,1 UA não perdem seu envelope primordial pela ação do vento estelar nem por fotoevaporação.

6 Conclusão

Viver em torno de uma estrela ativa pode ser muito perigoso, principalmente devido aos ventos estelares, superexplosões e ejeções de massa coronal. Estes fenômenos ativos podem arrancar a atmosfera planetária ou produzir dosagens letais de raios X e radiação UV para organismos vivos na superfície. A presença de uma magnetosfera pode ajudar a prevenir a perda atmosférica de um planeta. Assim, caracterizar a atividade estelar é fundamental para entender o clima espacial dos planetas em órbita.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os meus colaboradores que ao longo dos anos contribuíram para as minhas pesquisas tanto em física solar, quando em atividade estelar. Principalmente, muitos dos resultados apresentados neste artigo não seriam possíveis sem a parceria de meus alunos de pós-graduação a quem sou extremamente grata.

Sobre a autora

Adriana Valio (avalio@craam.mackenzie.br) é especialista em atividade solar e estelar, principalmente em explosões e manchas. Foi a primeira a desenvolver o método de mapeamento das manchas estelares a partir de trânsitos planetários.

Referências

- [1] A. V. R. Silva, *Nossa Estrela: o Sol* (Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- [2] A. D. Wittmann e Z. T. Xu, *A catalogue of sunspot observations from 165 BC to AD 1684*, *Astronomy & Astrophysics Supplement Series* **70**(1), 83 (1987). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1987A&AS...70...83W>, acesso em ago. 2022.
- [3] J. A. Eddy, *The Maunder Minimum*, *Science* **192**(4245), 1189 (1976).
- [4] A. Valio et al., *Correlations of Sunspot Physical Characteristics during Solar Cycle 23*, *Solar Physics* **295**(9), 120 (2020).
- [5] H. Schwabe, *Die Sonne. Von Herrn Hofrath Schwabe*, *Astronomische Nachrichten* **20**(17), 283 (1843).
- [6] H. Hudson e J. Ryan, *High-Energy Particles In Solar Flares*, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* **33**, 239 (1995).
- [7] S. W. Kahler, *Solar flares and coronal mass ejections.*, *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* **30**, 113 (1992).
- [8] M. Opher et al., *Magnetized jets driven by the Sun: The structure of the heliosphere revisited—Updates*, *Physics of Plasmas* **23**(5), 056501 (2016).
- [9] E. Parker, *Extension of the Solar Corona into Interplanetary Space*, *Journal of Geophysical Research* **64**(11), 1675 (1959).
- [10] E. N. Parker, *Hydromagnetic Dynamo Models.*, *The Astrophysical Journal* **122**, 293 (1955).
- [11] S. S. Vogt e G. D. Penrod, *Doppler imaging of spotted stars : application to the RS Canum Venaticorum star HR 1099.*, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **95**, 565 (1983).
- [12] K. G. Strassmeier, *Doppler imaging of stellar surface structure. XI. The super starspots on the K0 giant HD 12545: larger than the entire Sun*, *Astronomy & Astrophysics* **347**, 225 (1999). Disponível em <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999A&A...347..225S>, acesso em ago. 2022.
- [13] A. F. Lanza et al., *Modelling the rotational modulation of the Sun as a star*, *Astronomy & Astrophysics* **403**, 1135 (2003).
- [14] A. F. Lanza et al., *Magnetic activity in the photosphere of CoRoT-Exo-2a. Active longitudes and short-term spot cycle in a young Sun-like star*, *Astronomy and Astrophysics* **493**(1), 193 (2009). [ArXiv:0811.0461](https://arxiv.org/abs/0811.0461).
- [15] A. Silva-Válio, *Starspot detection from planetary transits observed by CoRoT*, in *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofísica Conference Series* (2009), vol. 35, 13–18. Disponível em <https://www.astroscu.unam.mx/RMxAC/vol35.html>, acesso em ago. 2022.
- [16] A. V. Silva, *Method for spot detection on solar-like stars*, *The Astrophysical Journal Letters* **585**(2), L147 (2003).
- [17] A. Valio et al., *Activity and rotation of Kepler-17*, *The Astrophysical Journal* **835**(2), 294 (2017).
- [18] A. Araújo e A. Valio, *Kepler-411 differential rotation from three transiting planets*, *The Astrophysical Journal Letters* **907**(1), L5 (2021).
- [19] W. J. Borucki et al., *Kepler planet-detection mission: introduction and first results*, *Science* **327**(5968), 977 (2010).

- [20] H. Maehara et al., *Superflares on solar-type stars*, *Nature* **485**(7399), 478 (2012).
- [21] A. Segura et al., *The effect of a strong stellar flare on the atmospheric chemistry of an Earth-like planet orbiting an M dwarf*, *Astrobiology* **10**(7), 751 (2010).
- [22] K. G. Kislyakova et al., *XUV-Exposed, Non-Hydrostatic Hydrogen-Rich Upper Atmospheres of Terrestrial Planets. Part II: Hydrogen Coronae and Ion Escape*, *Astrobiology* **13**(11), 1030 (2013). [ArXiv:1212.4710](#).
- [23] A. Skumanich, *Time Scales for Ca II Emission Decay, Rotational Braking, and Lithium Depletion*, *The Astrophysical Journal* **171**, 565 (1972).
- [24] G. Pace, *Chromospheric activity as age indicator. An L-shaped chromospheric-activity versus age diagram*, *Astronomy and Astrophysics* **551**, L8 (2013). [ArXiv:1301.5651](#).
- [25] D. Lorenzo-Oliveira et al., *The Solar Twin Planet Search. The age-chromospheric activity relation*, *Astronomy and Astrophysics* **619**, A73 (2018). [ArXiv:1806.08014](#).
- [26] V. S. Airapetian et al., *Impact of space weather on climate and habitability of terrestrial-type exoplanets*, *International Journal of Astrobiology* **19**(2), 136 (2020). [ArXiv:1905.05093](#).
- [27] R. C. Estrela e A. S. Valio, *Superflare ultraviolet impact on Kepler-96 system: A glimpse of habitability when the ozone layer first formed on Earth.*, *Astrobiology* **18**(11), 1414 (2018).
- [28] R. Estrela, S. Palit e A. Valio, *Surface and Oceanic Habitability of Trappist-1 Planets under the Impact of Flares*, *Astrobiology* **20**(12), 1465 (2020). [ArXiv:2008.09147](#).
- [29] K. Vida et al., *Frequent Flaring in the TRAPPIST-1 System—Unsuited for Life?*, *The Astrophysical Journal* **841**(2), 124 (2017). [ArXiv:1703.10130](#).
- [30] T. N. Woods et al., *Solar irradiance variability during the October 2003 solar storm period*, *Geophysical Research Letters* **31**(10), L10802 (2004).
- [31] S. L. Hawley e B. R. Pettersen, *The Great Flare of 1985 April 12 on AD Leonis*, *The Astrophysical Journal* **378**, 725 (1991).
- [32] J. T. O'Malley-James e L. Kaltenegger, *UV surface habitability of the TRAPPIST-1 system*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **469**(1), L26 (2017). [ArXiv:1702.06936](#).
- [33] A. Modi, R. Estrela e A. Valio, *Modeling the Atmospheric Evolution of Small Planets Orbiting M-dwarfs due to Stellar Wind and Photoevaporation* (2022), submetido ao Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

Um critério energético para o desenvolvimento de vida em um exoplaneta

Hermano Velten¹, Douglas Delladea¹ e Arthur Primola²

¹Universidade Federal de Ouro Preto

²Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

Este artigo faz uma revisão da hipótese PET (Proportional Evolutionary Time), recentemente proposta na literatura. Esta proposta sugere uma relação entre a quantidade máxima de energia incidente na superfície de um exoplaneta com o tempo necessário para o desenvolvimento de vida complexa. Como consequência, pode-se sugerir também uma relação entre a classificação espectral da estrela hospedeira e a probabilidade de que um de seus exoplanetas tenha atendido as condições energéticas para o desenvolvimento de vida. Além de apresentar esta hipótese, discutimos algumas possíveis extensões e aplicações. Como exemplo de um de nossos resultados, encontramos que já houve incidência energética suficiente no planeta Vênus capaz de viabilizar o desenvolvimento de vida complexa. O mesmo ainda não teria ocorrido em Marte. Também encontramos um possível contra-exemplo da hipótese PET. O exoplaneta GJ 887 b orbita uma estrela tipo *M* e recebeu energia suficiente para desenvolver vida complexa.

Abstract

In this article we review the Proportional Evolutionary Time hypothesis recently proposed in the literature. This proposal suggests a relation between the maximum incident energy on the surface of a exoplanet and the time required for the evolution of complex life. As a consequence, one can also suggest a relation to the spectral classification of the host star and the probability that one its exoplanets has attended the energetic conditions for the development of life. We also discuss possible extensions and applications. As an instance of one of our results, we find that the incidence of energy on Venus is sufficient to allow the evolution of complex life. The same did not happen to Mars. We also found an counter example of the PET hypothesis. The exoplanet GJ 887 b orbits a *M*-type star and but has received energy enough for the development of complex life.

Palavras-chave: astrobiologia, exoplanetas, desenvolvimento da vida.

Keywords: astrobiology, exoplanets, development of life.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38561](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38561)

1 Introdução

O número de exoplanetas já descobertos ultrapassou recentemente a marca de 5000. ¹ É impossível não se questionar se todos estes exoplanetas poderiam abrigar vida. Um primeiro palpite seria dizer que a grande maioria destes planetas não seriam potenciais hospedeiros de qualquer forma de vida, pelo menos as quais temos conhecimento. De fato, da nossa experiência com o sistema solar, até onde sabemos, apenas a Terra abriga vida, o que representa em torno de 10% da amostra de planetas que orbitam o Sol. Este número ficaria ainda menor se levássemos em conta os satélites

destes planetas. Mas qual seria um bom critério para definir se um planeta pode ou não abrigar a vida? Esta não é uma resposta simples e que depende de apenas um ou dois fatores. Ainda, estes critérios devem ser embasados em conceitos provenientes de disciplinas como física, química, geologia e, obviamente, biologia. Mas, ainda assim, seria possível simplificar esta tarefa tão complexa? Um critério simples pode surgir ao buscarmos algum conceito científico comum a todas as disciplinas: o conceito de energia. De fato, o desenvolvimento da vida precisou de energia e a fonte primária de energia de um planeta é sua estrela hospedeira.

No caso da Terra, o único ponto experimental da astrobiologia, é possível estimar a quantidade

¹Verificado em junho de 2022 no site <https://exoplanets.nasa.gov/>

de energia incidente em sua superfície desde a criação do sistema solar, 4,5 bilhões de anos atrás, momento no qual também se considera a formação planetária, até o instante onde as primeiras formas de vida surgiram no nosso planeta. Na ausência de outros critérios, este valor poderia ser utilizado como possível referência para se determinar quais exoplanetas já receberam energia suficiente de sua estrela hospedeira, assim os habilitando como possíveis hospedeiros de formas de vida. Mas, afinal, qual foi o tempo necessário para que a vida na Terra tivesse seu começo? Apesar de ainda ser tema de debate - veja uma discussão na referência [1] - as principais estimativas geológicas indicam o surgimento da vida microbiótica há pelos menos 3,7 bilhões de anos. No entanto, segundo *Bell et al.*, existem cristais de zircão encontrados na Austrália datados em 4,1 bilhões de anos que possuem razão entre os isótopos de carbono $^{13}C/^{12}C$ suficiente para sugerir uma origem biogênica [2]. Portanto, esta evidência sugere que um período de 400 milhões de anos foi necessário até o surgimento da vida na Terra.

Em um momento posterior na história evolutiva da vida terrestre, pode-se ainda falar no início da vida complexa, definida assim como na Ref. [3], referindo-se a organismos comparados a fungos multicelulares, plantas ou animais. Este segundo momento certamente precisou de alguns bilhões de anos para ocorrer.

Do ponto de vista astrofísico, esta linha de raciocínio pode indicar quais seriam os tipos de estrelas que teriam sido capazes de entregar a seus planetas orbitantes uma quantidade de energia suficiente para engatilhar a origem da vida ou até mesmo levá-los ao ponto de desenvolvimento de vida complexa. Assim, a busca por vida fora do sistema solar seria simplificada já que algumas estrelas seriam, a princípio, descartadas por não terem sido capazes de entregar uma quantidade mínima de energia. Sobre “tipos de estrelas” nos referimos à qual seria a sua classificação espectral. Vamos considerar estrelas na sequência principal que obedecem a classificação *OABFGKM*. Estrelas classificadas segundo esta sequência possuem valores decrescentes de massa, luminosidade e temperatura. Estrelas do tipo *O* são mais “potentes”, no sentido de serem mais luminosas, que estrelas tipo *A* e, assim, sucessivamente. Como exemplo, o Sol é uma estrela do tipo *G*. Pode-

mos então pensar que qualquer estrela do tipo *O, A, B, F* já teria sido capaz de entregar uma quantidade de energia suficiente de energia a seus exoplanetas. Por outro lado, e quanto às estrelas do tipo *K* e *M*?

Neste artigo faremos uma revisão da hipótese do tempo evolutivo proporcional cuja abreviação em inglês é PET.² Proposta nas referências [4, 5], a hipótese PET relaciona o tipo espectral da estrela hospedeira a com a probabilidade da existência de vida complexa. Segundo os resultados apresentados nestas referências, o tempo necessário para o desenvolvimento da vida complexa em planetas que orbitam estrelas com massas menores que a do Sol, como estrelas tipo *K* e *M*, deve ser bem maior que a idade do universo. Por outro lado, estrelas tipo *B* e *F* possuem um ciclo de vida muito curto e não “viveriam” o suficiente para entregar toda a energia necessária aos seus planetas próximos. Com isso, estrelas do tipo *G* e *K* ($m \gtrsim 0,7M_{\odot}$) seriam os melhores alvos para se tentar encontrar vida complexa em seus sistemas planetários.

Vamos apresentar os detalhes do cálculo da energia incidente sobre um planeta ao longo de sua história e, conseqüentemente, sua relação com a hipótese PET. Também faremos uma discussão sobre possíveis extensões desta hipótese e aplicaremos os critérios energéticos de referência da Terra para os resto do sistema solar e outros exoplanetas.

2 A hipótese PET (Prop Evol. Time)

Nosso objetivo nesta seção é muito simples: calcular a quantidade de energia incidente na Terra emitida pelo Sol ao longo de sua história evolutiva. No início desta seção seguiremos os desenvolvimentos apresentados por *Haqq-Misra* na Ref. [5]. É importante já ressaltar que esta análise poderá ser estendida a qualquer outro sistema planetário.

Iniciamos considerando que a estrela hospedeira emite energia seguindo o espectro de emissão de um corpo negro ideal. Sua radiância espectral é a potência emitida nos vários comprimentos de onda do espectro por unidade de área da superfície do corpo por esferorradiano. Esta quantidade é calculada com auxílio da lei de Planck

²Do inglês, Proportional Evolutionary Time (PET).

$$B(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad (1)$$

onde h é a constante de Planck, c a velocidade da luz no vácuo, λ o comprimento de onda do fóton emitido e T a temperatura da estrela (corpo negro emissor). Esta função possui um comportamento bem característico: para uma dada temperatura T , a função $B(\lambda)$ tende a zero tanto para fótons ultra energéticos (limite $\lambda \rightarrow 0$) quanto para a região de menor energia ($\lambda \rightarrow \infty$). Na prática, o espectro eletromagnético compreende ondas físicas que estão limitadas em um intervalo finito de comprimentos de onda. A parte mais energética do espectro corresponde aos raios gama e, na parte menos energética, as ondas de rádio.

Integrando esta expressão no ângulo sólido subtendido pelo Sol a uma distância equivalente à superfície da Terra encontra-se

$$F(T, \lambda) = \frac{\pi R_{\odot}^2}{D^2} B(T, \lambda), \quad (2)$$

onde R_{\odot} é o raio do Sol e D é a distância orbital terrestre média. A potência total recebida pela superfície da Terra dentro de uma faixa de comprimentos de onda $\lambda_{min} < \lambda < \lambda_{max}$ é obtida ao se integrar a expressão acima dentro deste intervalo de comprimentos de onda e, em seguida, multiplicando este resultado pela área da seção reta da Terra com um plano perpendicular ao plano orbital. Esta quantidade será designada por P_{bio} e é calculada por meio da expressão

$$P_{bio}(T) = \pi R_{\oplus}^2 \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} F(T, \lambda) d\lambda, \quad (3)$$

onde R_{\oplus} é o raio da Terra.

A chamada janela dos comprimentos de onda capazes de gerar energia livre para o desenvolvimento de vida complexa está compreendida entre $\lambda_{min} = 200$ nm e $\lambda_{max} = 1200$ nm. Lembrando que o espectro visível que vai do azul (400 nm) até o vermelho (750 nm) está compreendido dentro dessa faixa. Para se ter uma noção do espectro de emissão de fótons do Sol, de acordo com (1), uma temperatura de 5780 K possui seu máximo em torno de 500 nm. Abaixo do valor mínimo de 200 nm a radiação pode interagir com o tecido biológico causando mutações ou dissociações. O limite máximo de 1200 nm corresponde à mínima energia de um fóton capaz de ionizar elementos

químicos, um fator relevante para a disponibilização de energia livre no planeta.

A energia total que o Sol emitiu em um intervalo de tempo é obtida integrando sua luminosidade L (energia por intervalo de tempo) $E = \int L dt$. De fato, é importante lembrar que o Sol, assim como qualquer estrela, possui um processo evolutivo e, com isso, sua luminosidade mudou desde sua formação até hoje. Em outras palavras, a potência do Sol não é constante com o tempo. Para contornar essa situação, basta incluir na nossa análise um modelo para a evolução temporal da luminosidade solar. Uma expressão conhecida na literatura é [6]

$$L(t) = L_{\odot} \left[1 + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{t}{t_{\odot}} \right) \right]^{-1}. \quad (4)$$

Quando $t = t_{\odot}$ temos a luminosidade solar atual. Portanto, t_{\odot} representa a idade do sistema solar e será considerado o valor de $t_{\odot} = 4,5$ bilhões de anos.

O próximo passo será substituir L_{\odot} em (4) pela expressão encontrada para P_{bio} em (3). Com isso, teremos uma indicação da variação temporal da quantidade P_{bio} . A integração desta quantidade no tempo nos fornecerá uma medida da quantidade de energia disponibilizada ao planeta

$$\begin{aligned} E_{bio}(T) &= \int_0^{t_{\odot}} \frac{P_{bio}(T) dt}{\left[1 + \frac{2}{5} \left(1 - \frac{t}{t_{\odot}} \right) \right]} \quad (5) \\ &= \frac{5}{2} \ln \left(\frac{7}{5} \right) t_{\odot} P_{bio}(T). \end{aligned}$$

Ao utilizarmos a temperatura $T = 5780K$ na expressão acima, encontramos que a energia disponibilizada ao planeta Terra pelo Sol ao longo de toda sua história evolutiva foi de $E_{bio} = 1,7 \times 10^{34}$ Joules.

Para verificar se esta estimativa é confiável, podemos substituir a expressão (4) por modelos mais complexos para a evolução da luminosidade estelar. Em *Baraffe et al* [7] são calculadas as propriedades estelares levando em conta códigos numéricos que incluem em sua análise aspectos como as abundâncias moleculares e a convecção da atmosfera estelar para estrelas de diversas massas. Ao usarmos os resultados numéricos de *Baraffe et al* encontramos o mesmo valor para E_{bio} . Portanto, seguindo a hipótese PET, definiremos que a quantidade de energia incidente em um planeta necessária para o surgimento de vida complexa em um exoplaneta é

$$E_{bio}^{Comp} = 1,7 \times 10^{34} \text{ Joules.} \quad (6)$$

Cabem aqui alguns comentários sobre este resultado.

Nesta estimativa não é considerado o albedo do planeta. O albedo é a quantidade de radiação solar refletida de um objeto com relação a quantidade de energia incidente. O cálculo desta quantidade depende de vários fatores sobre a atmosfera e superfície planetária. Por exemplo, o gelo oceânico possui maior albedo do que um deserto. Assim, seguindo a maneira como a hipótese PET é estipulada, a quantidade E_{bio} deve ser considerada como um limite superior a energia livre disponível ao planeta capaz de iniciar processos biológicos. Portanto, o valor encontrado em (6) é a estimativa mais conservadora possível.

É importante lembrar novamente que a quantidade encontrada acima refere-se a quantidade total de energia incidente sobre a Terra ao longo dos seus 4,5 bilhões de anos. Por isso, refere-se a uma estimativa da quantidade de energia incidente necessária para o surgimento de vida complexa. No entanto, podemos novamente tomar a Terra como exemplo e calcular a energia incidente até um momento anterior, quando as primeiras formas de vida surgiram no planeta. Ao substituímos t_{odot} por um novo valor de referência de 400 milhões de anos, encontramos

$$E_{bio}^{min} = 1,23 \times 10^{33} \text{ Joules.} \quad (7)$$

Este valor é cerca de 10 vezes menor que o encontrado em (6) indicando que a luminosidade solar permaneceu aproximadamente constante nos últimos 4 bilhões de anos.

3 Aplicações da proposta PET

Aplicações da hipótese PET nos permitirão uma compreensão mensurável da energia incidente que um planeta ou satélite já recebeu de sua estrela hospedeira. Comparar a energia que o planeta Terra já recebeu para o surgimento de vida E_{bio}^{min} ou de vida complexa na Terra E_{bio}^{Comp} , com outros corpos celestes nos permitirá ponderar quais corpos receberam teriam capacidade de abrigar vida.

3.1 Sistema solar: planetas e seus satélites

Nosso sistema solar é composto por uma estrela principal, o Sol, que fornece energia para os Planetas, seus Satélites Naturais e Proto-Planetas/Planetas-anões. Além disso temos outros componentes como Cometas, Meteoroides e o próprio Meio Interplanetário. Os Planetas são separados em dois principais grupos, os Terrestres/Telúricos e os Gasosos/Jovianos. Os planetas chamados de Terrestres recebem esse nome por terem em sua composição material rochoso como principal constituinte, e englobam Mercúrio, Vênus, Terra e Marte. Já os Gasosos recebem essa nomenclatura por terem como maior constituinte gases, englobam os planetas, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno.

Na tabela 1 apresentamos os resultados da aplicação da hipótese PET aos principais objetos do sistema solar. Na primeira coluna listamos os objetos estudados como os planetas e algumas luas. Na segunda coluna temos o raio médio do objeto. Na terceira coluna temos a distância orbital média. Em nossa aproximação, estamos assumindo que a durante toda a existência do sistema solar sua configuração orbital manteve-se inalterada. Apesar de esta não ser uma prática realista, nos permitirá estimar a magnitude da energia incidente em cada objeto. Na quarta coluna apresentamos a quantidade de radiação incidente neste objeto durante todo o tempo de formação do sistema solar E_{bio} . Na quinta coluna fazemos uma comparação com o valor encontrado para E_{bio} e a referência para o surgimento de vida complexa E_{bio}^{comp} . Na última coluna fazemos uma comparação do valor obtido para E_{bio} com o valor E_{bio}^{min} .

O símbolo \boxtimes indica que a energia incidente sobre o objeto é inferior ao valor de referência adotado em cada coluna. O símbolo \checkmark indica que E_{bio} foi maior que o valor de referência.

Todos os planetas do sistema solar anteriores à Saturno já receberam uma energia superior a E_{bio}^{min} . Os demais corpos do sistema solar receberam quantidades de energia inferiores a E_{bio}^{min} e, conseqüentemente, também inferiores a E_{bio}^{comp} .

Vênus e Júpiter são os únicos corpos do sistema solar que já receberam uma quantidade de energia maior que E_{bio}^{comp} . Mesmo Júpiter possuindo uma distância orbital média muito maior, seu raio é produz uma enorme área de incidência. Marte, com um raio de cerca de metade do valor da Terra, não teve uma incidência de energia

suficiente para alcançar o valor E_{bio}^{comp} .

3.2 Exoplanetas próximos

- Proxima Centauri b

Proxima Centauri é uma estrela tipo M, muito mais fria que o Sol e está distante apenas 4,22 anos-luz de nós. Seu sistema planetário é composto por apenas um exoplaneta: Proxima Centauri b, descoberto em 2016. Com uma massa de 1,27 massas terrestres, sua órbita tem período de 11,2 dias e possui distância orbital média de 0,0485 UA. Proxima Centauri b possui Índice de Similaridade com a Terra 0,87, o que o torna um dos exoplanetas mais similares com a Terra [8].

Encontramos para Proxima Centauri b

$$E_{bio}^{PCb} = 5,04 \times 10^{33} \text{ Joules.} \quad (8)$$

Apesar de $E_{bio}^{PCb} < E_{bio}^{comp}$, trata-se de uma quantidade de energia acima do limite mínimo $E_{bio}^{PCb} > E_{bio}^{min}$.

- GJ 887 b

Descoberto recentemente, em 2020, este exoplaneta possui uma massa de 4,2 massas terrestres e um raio planetário estimado em 1,88 vezes o raio da Terra. Trata-se, portanto, de uma Super Terra. Ele possui órbita com período de 9,3 dias a uma distância orbital média de 0,068 UA. Sua estrela hospedeira, GJ 887, possui massa de $0,49M_{\odot}$, temperatura efetiva de 3688 K e raio $0,47R_{\odot}$. GJ 887 b encontra-se fora da zona habitável de seu sistema.

Encontramos

$$E_{bio}^{GJ887b} = 1,05 \times 10^{36} \text{ Joules,} \quad (9)$$

um valor que excede E_{bio}^{comp} em duas ordens de magnitude.

- Ross 128 b

Este exoplaneta é uma super Terra com $1,4M_{\odot}$ e um raio cerca de 10% maior que o terrestre. Encontra-se distante 11 anos-luz do sistema solar e orbita uma estrela tipo M. Suas propriedades foram estudadas em [9] e há fortes indícios que a formação e a composição de deste exoplaneta sejam bem parecidas com a Terra. O valor de E_{bio} encontrado é

$$E_{bio}^{Ross128b} = 1,41 \times 10^{34} \text{ Joules.} \quad (10)$$

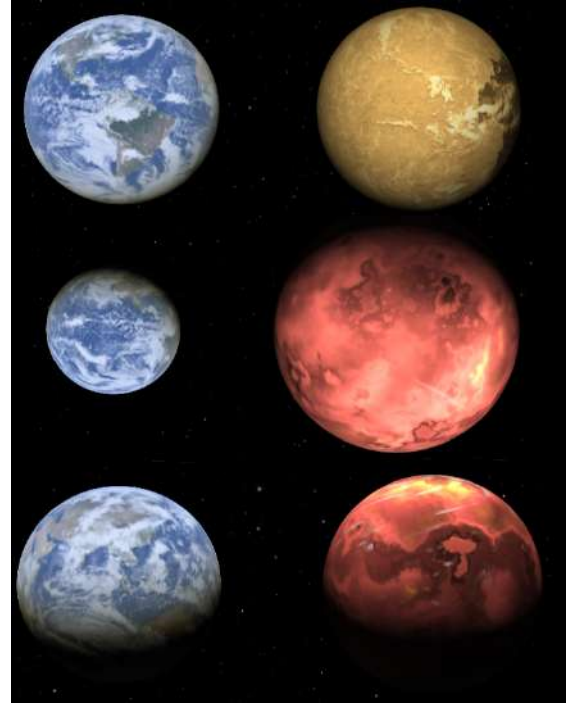


Figura 1: Uma representação hipotética das dimensões comparadas dos exoplanetas Proxima Centauri b (superior), GJ 887 b (meio) e Ross 128 b (inferior) com a Terra. A figura foi composta a partir da visualização obtida no site <https://exoplanets.nasa.gov>.

Assim como no caso de Proxima Centauri b, $E_{bio}^{min} < E_{bio}^{Ross128b} < E_{bio}^{comp}$.

A Figura 1 apresenta uma comparação das dimensões dos planetas Proxima Centauri b, GJ 887 b e Ross 128 b com a Terra que aparece sempre no lado esquerdo desta figura. As representações destes exoplanetas são hipotéticas e foram retiradas de <https://exoplanets.nasa.gov>.

4 Considerações Finais

Fizemos uma rápida revisão da hipótese do tempo evolutivo proporcional proposta recentemente por *Haqq-Misra* [5]. O ponto central aqui é tentar relacionar a quantidade de energia incidente em um planeta com a classificação espectral de sua estrela hospedeira.

Aqui, fizemos a extensão da análise feita em [5] em duas direções. Primeiro, além de calcular a quantidade de energia necessária para o surgimento de vida complexa E_{bio}^{comp} , que leva em conta a incidência de energia na escala de bilhões de anos, também calculamos a quantidade E_{bio}^{min} , o que seria uma medida da quantidade mínima de energia incidente para o surgimento de formas

Tabela 1: Objetos celestes do sistema solar, seu raio, distância orbital média e o valor da energia incidente ao sua superfície.

Objeto	Raio do objeto	$D_{orb}(UA)$	E_{bio} (Joules)	$E > E_{bio}^{comp}$	$E > E_{bio}^{min}$
Mercúrio	0,3829	0,387	$1,6308 \times 10^{34}$	☒	✓
Vênus	0,9499	0,723	$2,8562 \times 10^{34}$	✓	✓
Terra	1	1	$1,66591 \times 10^{34}$	✓	✓
Marte	0,533	1,524	$2,03768 \times 10^{33}$	☒	✓
Júpiter	11,21	5,204	$7,73017 \times 10^{34}$	✓	✓
Saturno	9,45	9,582	$1,62033 \times 10^{34}$	☒	✓
Urano	4,01	19,201	$7,26596 \times 10^{32}$	☒	☒
Netuno	3,88	30,047	$2,77788 \times 10^{32}$	☒	☒
Plutão	0,18	39,44	$3,46995 \times 10^{29}$	☒	☒
Lua	0,27	1	$1,21445 \times 10^{33}$	☒	☒
IO	0,285	5,204	$4,99652 \times 10^{31}$	☒	☒
Europa	0,244	5,204	$3,66233 \times 10^{31}$	☒	☒
Ganimedes	0,413	5,204	$1,04925 \times 10^{32}$	☒	☒
Calisto	0,377	5,204	$8,743 \times 10^{31}$	☒	☒
Titã	0,4	9,582	$2,90309 \times 10^{31}$	☒	☒
Encelados	0,039	9,582	$2,75975 \times 10^{29}$	☒	☒

primitivas de vida. Esse valor assume como referência que a vida na Terra surgiu em uma escala de tempo de 400 milhões de anos. Além de introduzir a quantidade E_{bio}^{min} , também aplicamos o cálculo de E_{bio} para os demais corpos do sistema solar e para dois exoplanetas. Nossos resultados para o sistema solar foram apresentados na tabela 1. Os resultados encontrados para o planeta Vênus são, talvez, os mais interessantes.

Nosso cálculo de E_{bio} para os dois exoplanetas mais próximos da Terra também se revelaram interessantes. E_{bio} calculado para Próxima Centauri b é superior ao limite mínimo E_{bio}^{min} , o mesmo valendo para Ross 128 b. Já o resultado encontrado para o exoplaneta GJ 887 b pode ser um contra-exemplo da hipótese PET defendida em [5] pois, esmo orbitando uma estrela tipo M, seu valor de E_{bio} é cerca de 100 vezes a quantidade de referência para o surgimento de vida complexa.

Finalizamos esse trabalho com algumas ressalvas sobre a interpretação dos nossos resultados. Nosso objetivo aqui foi apresentar como é possível fazer uma introdução ao estudo da astrobiologia com ferramentas teóricas relativamente sim-

ples. Os cálculos apresentados neste artigo deve ser acessíveis a estudantes de graduação. Mesmo com tal simplicidade matemática e computacional, foi possível acompanhar e desenvolver resultados recentes da literatura especializada. A implementação da hipótese PET feita neste trabalho não leva em conta fatores importantes como, por exemplo, a influência do albedo planetário. Aqui, consideramos uma reflexão nula enquanto que o albedo médio terrestre é de 0,3. Ao considerarmos o albedo em nossos cálculos encontraríamos valores para E_{bio} menores. Uma albedo de 0,5 reduziria o valor E_{bio} por um fator 2. Ainda assim teríamos uma boa estimativa da a ordem de magnitude da energia incidente.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer a Jacob Haqq-Misra, José Antônio de Freitas Pacheco e Beatriz Siffert pelos comentários na fases iniciais desse trabalho. Os autores agradecem a FAPES/CNPq/CAPES e Proppi/UFOP pelo apoio.

Sobre os autores

Hermano Velten (hermano.velten@ufop.edu.br) é docente do departamento de física da UFOP, realiza pesquisas nas áreas de astrofísica, cosmologia e gravitação e bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq.

Douglas Delladea Junior (douglas.junior@aluno.ufop.edu.br) é aluno do curso de ciências biológicas da UFOP.

Arthur Primola (arthurprimola@ufmg.br) é aluno do curso de ciências biológicas da UFMG.

Referências

- [1] J. A. de Freitas Pacheco, *Vida no Universo* (EDUSP, São Paulo, 2020).
- [2] E. A. Bell et al., *Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **112**(47), 14518 (2015).
- [3] P. Ward e D. Brownlee, *Rare Earth: Why Complex Life Is Uncommon in the Universe* (Copernicus books, New York, 2003).
- [4] J. Haqq-Misra, R. K. Kopparapu e E. T. Wolf, *Why do we find ourselves around a yellow star instead of a red star?*, *International Journal of Astrobiology* **17**(1), 77–86 (2018).
- [5] J. Haqq-Misra, *Does the evolution of complex life depend on the stellar spectral energy distribution?*, *Astrobiology* **19**(10), 1292 (2019).
- [6] D. O. Gough, *Solar Interior Structure and Luminosity Variations*, *Solar Physics* **74**(1), 21 (1981).
- [7] I. Baraffe et al., *New evolutionary models for pre-main sequence and main sequence low-mass stars down to the hydrogen-burning limit*, *Astronomy & Astrophysics* **577**, A42 (2015).
- [8] D. Schulze-Makuch et al., *A two-tiered approach to assessing the habitability of exoplanets*, *Astrobiology* **11**(10), 1041 (2011).
- [9] D. Souto et al., *Stellar and planetary characterization of the ross 128 exoplanetary system from APOGEE spectra*, *The Astrophysical Journal* **860**(1), L15 (2018).

AstroBioQuímica em ambientes inóspitos: estudo de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos em galáxias ativas

Dinalva A. Sales e Carla M. Canelo

Universidade Federal do Rio Grande

Resumo

Galáxias ativas (AGN) são aquelas em que buracos negros supermassivos (SMBHs) em seus núcleos estão capturando matéria através de um disco de acreção. Dentro do paradigma dos AGNs, um ponto ainda em debate é o do surgimento dessa atividade, desde qual o mecanismo que a provoca até como isso afeta a poeira e as moléculas nas galáxias. Para avançar nossos conhecimentos nesta questão, é preciso a realização de estudos sobre a origem e a alimentação dos SMBHs em AGNs através das emissões moleculares em galáxias, como em galáxias Megamaser de hidroxila (OHMGs), Seyfert e Starburst. Este trabalho mostra que, em AGNs, moléculas orgânicas de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) são maiores (> 180 átomos de carbono) do que em galáxias com região de formação estelar. Este fato implica que PAHs sobrevivem às intensas radiações e evoluem ao longo da evolução do Universo, em que vão crescendo e incorporando nitrogênios. Esses heterociclos policíclicos aromáticos nitrogenados (PANHs), que podem variar a emissão da banda de PAH em 6.2 μm , podem fornecer o elo perdido entre a bioquímica dos PAHs, vistos no gás e poeira das galáxias, e as nucleobases que constituem o maquinário codificador da vida na Terra.

Abstract

Active galaxies (AGNs) are those in which supermassive black-holes (SMBHs) in their core are capturing matter through an accretion disk. Within the paradigm of AGNs, a point still under debate originates this activity, from what mechanism causes it to how does it affect dust and molecules in galaxies. In order to advance our knowledge in this question, one must conduct studies on the origin and feeding of SMBHs in AGNs through molecular emissions in galaxies, such as OH Megamaser galaxies (OHMGs), Seyfert and Starburst galaxies. This work shows that, in AGNs, organic molecules of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are larger (>180 carbon atoms) than in galaxies with star formation region. This fact implies that PAHs survive the intense radiation and evolve throughout the evolution of the universe, where they grow and incorporate nitrogen. These polycyclic aromatic nitrogen heterocycles (PANHs), which can vary the PAH band emission at 6.2 μm , can provide the missing link between the biochemistry of PAHs, seen in the gas and dust of galaxies, and the nucleobases that constitute the coding machinery of life on Earth.

Palavras-chave: astronomia extragaláctica, astrobiologia, astroquímica, núcleo ativo de galáxias.

Keywords: extragalactic astronomy, astrobiology, astrochemistry, active galactic nuclei.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38711](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38711)

1 Introdução

Considerando-se a classe de macromoléculas e sua relevância no estudo do Universo, os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs) representam um arranjo efetivo que pode acumular cerca de 15% do carbono no meio interestelar (ISM), sendo o material orgânico dominante no espaço [1]. Essas moléculas podem ter contribuído para a construção do material pré-biótico que formou a vida na Terra, especialmente quando seus átomos de hidrogênio ou carbono são substituídos por nitrogênio, dando origem aos PANHs (hete-

rociclos policíclicos aromáticos nitrogenados). Os espectros no infravermelho médio (MIR) de objetos galácticos e extragalácticos são dominados por bandas de emissão fortes a 3.3, 6.2, 7.7, 8.6, 11.3 e 12.7 μm , geralmente atribuídas aos PAHs e espécies relacionadas [2].

Embora PAHs sejam abundantes e onipresentes em quase todos os ambientes astrofísicos relacionados com gás, poeira e iluminação por fótons ultravioleta (UV) [3], o estudo de PAHs tem se concentrado principalmente em objetos galácticos. Inclusive, por muito tempo acreditou-se que

galáxias que possuem buracos-negros supermassivos (SMBH), nomeadas como núcleo ativo de galáxias (AGNs), possuem um intenso e energético campo de radiação oriundo do disco de acreção do SMBH capaz de destruir as moléculas de PAHs próximas dos SMBHs dos AGNs. A falta de dados com alta resolução angular e espectral ajudou a dificultar a compreensão das propriedades físico-químico dos PAHs e de seu uso como ferramenta de diagnóstico da fonte de ionização em galáxias. Graças aos espectros obtidos com os telescópios espaciais ISO e Spitzer, as análises dos PAHs em fontes extragalácticas foram largamente ampliadas e muitos autores produziram diagramas de diagnósticos usando as intensidades de bandas dos PAHs como uma ferramenta para distinguir as contribuições vinda de diferentes tipos de fontes de ionização, estelar no caso de galáxias Starburst ou lei de potência vinda do disco de acreção do AGN [4–15].

Alguns trabalhos propuseram diagramas de diagnósticos que mostram que a emissão no MIR de AGNs é claramente diferente daquelas dominadas por um núcleo Starburst – galáxia dominada por formação estelar [4, 5, 11, 12, 16]. Eles perceberam que o espectro de um AGN extremamente luminoso apresenta as bandas dos PAHs muito fracas ou até mesmo ausentes, uma vez que a radiação vinda do núcleo ativo estaria destruindo a poeira localizada próxima ao núcleo. Por outro lado, quando analisa-se os espectros de Starbursts, essas bandas são muito intensas e muita atenção foi destinada para tentar discriminar se a radiação que excita essas moléculas provem das estrelas ou do AGN. Atualmente, a detecção de PAHs a até uma dúzia de parsecs do AGN indica a presença de um material empoeirado, como um toro nuclear ou disco, que permite a sobrevivência dessas moléculas em ambientes tão próximos a AGNs [12, 14, 17–20]. Este trabalho resume alguns resultados importantes para a AstroBioQuímica em ambientes inóspitos como galáxias ativas, AGNs e Starburst. Será apresentado resultados de estudos físico-químico de moléculas de PAHs usando dados públicos espectroscópicos observados com o telescópio espacial Spitzer.

1.1 Estruturas dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

Os PAHs são moléculas orgânicas que possuem uma rede hexagonal planar aromática formada

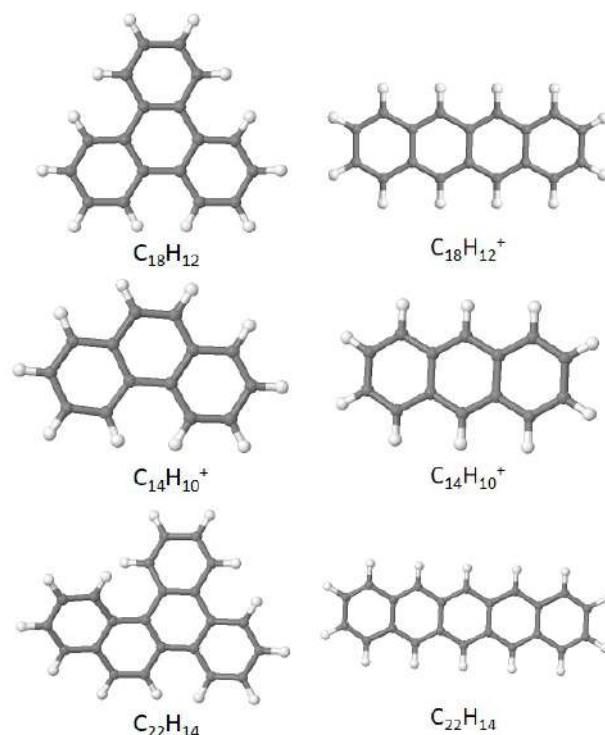


Figura 1: Estrutura molecular dos PAHs. Pericondensados encontram-se à esquerda e os catacondensados à direita juntamente com seus respectivos tamanhos.

por átomos de carbono. Essa geometria hexagonal produz uma grande energia de ligação entre esses átomos de carbono, o que tornam essas moléculas bastante estáveis e consequentemente de difícil dissipação [21]. Pelo fato do ISM favorecer a hidrogenação e devido à sua robustez, a estrutura mais comum do carbono nesse meio está na forma de PAHs e, além disso, eles também estão entre as mais abundantes espécies moleculares que devem ter sido transportadas quase intactas aos planetas [22].

A falta de tecnologias para calcular as propriedades óticas desses PAHs hipotéticos atrasou muito sua implementação nos modelos de grãos e esse cenário só pôde ser melhorado quando se desenvolveu técnicas laboratoriais e computacionais mais avançadas. No entanto, atualmente é possível encontrar espectros de emissão e absorção disponíveis na literatura [23–25]. Alguns autores disponibilizam espectros modelados [26] e, inclusive, existe uma grande biblioteca do “NASA AMES Research Center PAH IR Spectral Database” formada por 4.233 espectros teóricos modelados usando teoria do funcional de densidade (DFT; ver, por exemplo, Ref. [27]).

As moléculas de PAHs podem apresentar di-

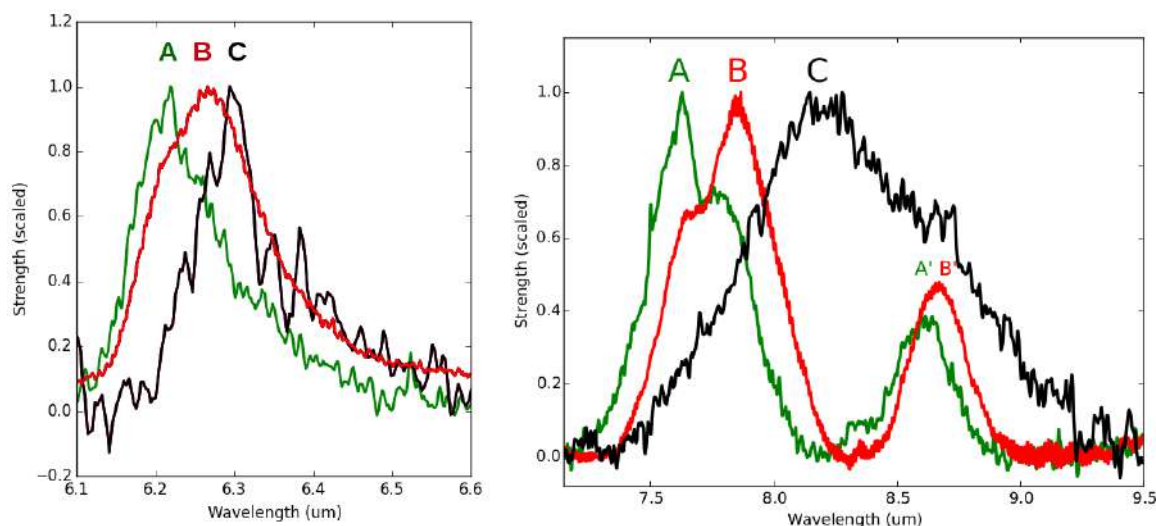


Figura 2: Visão geral das possíveis diferenças no perfil das bandas de 6.2, 7.7 e 8.6 μm , divididas em três classes (A, B e C) e ilustradas pelos espectros normalizados dos objetos: A – região HII IRAS 23133+6050; B – estrela Pós-AGB HD 44179; e C – estrela Pós-AGB IRAS 13416 - 6243. Espectros normalizados disponibilizados por [28,29].

versas estruturas, das quais pode se destacar os pericondensados, catacondensados e aqueles que tem seus anéis aromáticos ligados por uma ligação simples entre carbonos $C - C$. Os aromáticos pericondensados são moléculas que compartilham, pelo menos, um átomo de carbono entre três anéis, como o coroneno, ovaleno, perileno, pireno, etc. Enquanto que nos aromáticos catacondensados nenhum carbono pertence a mais do que dois anéis (veja a Figura 1). É valioso lembrar que os PAHs mais estáveis são os mais compactos e menos suscetíveis à reatividade química e fragmentação, como os pericondensados e os PAHs simétricos [30].

Também é importante destacar o comportamento das bandas de PAH da região espectral do MIR entre 3 e 12 μm em uma amostra composta por mais de 200 galáxias dominadas por Starburst em diferentes redshift. As variações nos perfis causadas por diversos fatores – desde condições físicas locais como características da população de PAHs – levaram à divisão das bandas em três classes A, B e C, ou classes de Peeters, exemplificadas na Figura 2. No caso da banda de 6.2 μm , a observação do desvio do pico de emissão para o azul da classe A só pode ser reproduzido pela emissão de um caso especial da molécula de PAHs, onde a mesma, catalizou o nitrogênio disponível tornando-se PANHs [31,32]. Perfis da classe A dessa banda têm se mostrado dominantes no Universo, inclusive em galáxias distantes e especialmente naqueles com emissão dominada

por intensa formação estelar, Starburst [33,34].

2 Amostra e tratamento dos dados

O estudo das moléculas orgânicas de PAHs está pautado em derivar as propriedades vibracionais dessas moléculas, conseqüentemente, o melhor intervalo espectral para esse estudo é o MIR. Nas últimas décadas os melhores dados espectroscópicos nesse comprimento de onda foram observados pelo telescópio espacial Spitzer através do instrumento *The Infrared Spectrograph* (IRS) [35]. A importância do telescópio Spitzer é ter dados de imagens e espectros no MIR de fácil acesso e análise, assim como, disponibilidade pública na literatura. Além disso, vale a pena relatar que o mesmo trouxe muito avanço científico das emissões moleculares e de poeira dos objetos galáctico e extragaláctico, onde, mostrou-se um importante precursor para o atual telescópio espacial James Webb.

A bandeja do IRS é composta por quatro espectrógrafos separados, cada par de instrumento contém espectrógrafos com baixa ($R = \lambda/\Delta\lambda \sim 60-120$) e alta resolução ($R = \lambda/\Delta\lambda \sim 600$). Os módulos de baixa resolução são nomeados como *short-low* (SL) e *long-low* (LL) e os de alta resolução como *short-high* (SH) e *long-high* (LH). A Tabela 1 apresenta mais informações sobre o IRS (para mais detalhes, ver Ref. [35]).

Os resultados mostrados nesse estudo utilizou dados espectroscópicos públicos de galáxias ativas

Tabela 1: Propriedades do IRS

Módulo	Array	Escala Espacial do Pixel	Ordem	Tamanho da Fenda	λ (μm)	R ($\lambda/\Delta\lambda$)	Tamanho Espacial ¹ da Extração
Short-Low	Si:As	1.8''	SL2	3.6'' × 57''	5.2 - 7.7	80 - 128	7.2''
			SL1	3.7'' × 57''	7.4 - 14.5	64 - 128	
Long-Low	Si:Sb	5.1''	LL2	10.5'' × 168''	14.0 - 21.3	80 - 128	21.42''
			LL1	10.7'' × 168''	19.5 - 38.0	64 - 128	
Short-High	Si:As	2.3''	SH	4.7'' × 11.3''	9.9 - 19.6	~ 600	-
Long-High	Si:Sb	4.5''	LH	11.1'' × 22.3''	18.7 - 37.2	~ 600	-

¹Tamanho padrão da extração do programa SPICE do Spitzer.

observados com o telescópio Spitzer. A amostra de AGNs foi composta com os seguintes critérios: (i) selecionar um grande número de galáxias Seyfert que tivessem dados espectrais disponíveis nos arquivos públicos do Spitzer; (ii) escolher objetos que tivessem espectros no intervalo entre 5.2 e 38 μm ; e (iii), incluir na amostra galáxias do tipo Starburst e regiões H II para realizar uma análise comparativa.

Dessa forma, a amostra final de galáxias ativas é composta por 186 objetos, dos quais 15 AGNs foram estudados pela primeira vez na Ref. [12], 83 AGNs estudados na Ref. [36], 22 galáxias Starburst do trabalho [37], 59 regiões H II extragalácticas e LINERs do estudo da Ref. [8] e 7 regiões H II da galáxia M101 da amostra da Ref. [11]. A amostra do estudo sobre o perfil de PAH em 6.2 μm é composta por 257 galáxias cuja emissão foi considerada dominada por Starbursts (mais informações nas Refs. [38, 39]).

Os dados espectrais são tratados seguindo técnicas padrão para o IRS do Spitzer e para isso foi usado imagens de *background* (imagem obtida de uma região próxima da fonte que tenha apenas luz do céu), *flat-field*,¹ *máscaras* para remoção de pixels ruins e *dark*. Para fazer a calibração em comprimento de onda observou-se espectros dos objetos PNM 1-42, NGC 7293, NGC 6781, NGC 7027, G 333.9+00.6 e NGC 6543. Informações detalhadas sobre cada passo podem ser obtidas no *IRS Instrument Handbook*.² Para a amostra de galáxias dominadas por Starburst os dados tratados estão públicos e foram obtidos pelo projeto Spitzer/IRS Atlas [38, 39].

¹É importante relatar que a imagem de *flat-field* é corrigida pela luz zodiacal.

²<http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irs/irsinstrumenthandbook/1/>

3 Propriedades dos PAHs em ambientes inóspitos

Como é perceptível o estudo da “AstroBioQuímica” é uma ciência multidisciplinar e este trabalho tem como principal objetivo investigar as propriedades físico-químico das moléculas orgânicas de PAHs ao longo da evolução do Universo para encontrar o elo perdido entre a bioquímica dessas moléculas e as nucleobases do DNA e RNA que constituem o maquinário codificador da vida na Terra. Nesse sentido é possível derivar as propriedades de PAHs em amostra de galáxias ativas do tipo AGNs e Starburst.

3.1 Tamanho e estado de ionização dos PAHs em AGNs

A Figura 3 mostra as 186 galáxias distribuídas em um diagrama teórico (ver Ref. [40]), que é utilizado para derivar as propriedades do estado de ionização e o tamanho das moléculas de PAHs através das razões de bandas observadas 6.2 $\mu\text{m}/7.7\mu\text{m}$ e 11.3 $\mu\text{m}/7.7\mu\text{m}$, respectivamente. As razões teóricas 6.2 $\mu\text{m}/7.7\mu\text{m}$ × 11.3 $\mu\text{m}/7.7\mu\text{m}$ são as linhas tracejadas calculadas em [40]. Os objetos foram divididos em Seyfert 1, Seyfert 2, Starburst e H II+LINER e são representados no diagrama por círculos preenchidos, círculos vazios, triângulos preenchidos e triângulos vazios, respectivamente (mais informações podem ser encontradas na Ref. [12]).

Também podemos verificar nessa figura que os pontos observados estão espalhados nas regiões entre as linhas teóricas dos PAHs neutros e ionizados [40], corroborando com estudos prévios (por exemplo, Refs. [40–43]). A partir do diagrama de diagnóstico pode-se concluir que as linhas de

emissão dos PAHs tanto para AGNs quanto para objetos com baixo potencial de ionização (Starburst e LINER) são uma composição apropriada de várias moléculas com diferentes tamanhos e uma adequada fração de ionização (cargas neutras para ionizadas).

Ainda na Figura 3, percebe-se uma clara separação das galáxias por tipos de atividades. Essa segregação sugere que os objetos com alto potencial de ionização possuem moléculas com mais de 180 átomos de carbono ($6.2\mu\text{m}/7.7\mu\text{m} < 0.2$). Por outro lado, a maioria dos objetos com baixo potencial de ionização estão localizados na região que indica que as moléculas são formadas com menos de 180 átomos de carbono, ou seja, possuem valores de $0.2 < 6.2\mu\text{m}/7.7\mu\text{m} < 0.4$ (ver estudo completo na Ref. [12]).

Ademais, é possível ver na figura que as galáxias tipo Seyfert estão localizadas próximo da região dos PAHs ionizados, enquanto que a maioria dos Starburst, H II e LINERs estão próximos a linha que representa os PAHs neutros. Esses resultados obtidos sugerem que os AGNs possuem valores, tanto da fração de ionização quanto do tamanho dos PAHs, maiores comparado com as galáxias Starburst. Entretanto, uma localização preferencial das galáxias Seyfert 1 e Seyfert 2 não pôde ser definida com esse diagrama (ver estudo completo na Ref. [12]).

Uma outra forma compreender o processo de emissão das moléculas de PAHs é testar diagramas de diagnósticos que envolvem bandas predominantemente aparentes em moléculas com cargas neutras ($8.6\mu\text{m}$ e $11.3\mu\text{m}$) e ionizadas ($6.2\mu\text{m}$ e $7.7\mu\text{m}$). De fato, tais diagramas demonstraram que existem correlações entre razões que usam essas linhas [9, 10, 42]. Como esses estudos utilizaram amostras formadas em sua maioria por galáxias Starburst, também foram construídos novos diagramas com os 98 AGNs e 22 Starburst da amostra desse trabalho.

Logo, foi possível fazer uma análise quantitativa do comportamento da ionização dos PAHs em AGNs e Starburst usando diagramas diagnóstico $6.2\mu\text{m}/11.3\mu\text{m} \times 7.7\mu\text{m}/11.3\mu\text{m}$ e $6.2\mu\text{m}/8.6\mu\text{m} \times 7.7\mu\text{m}/8.6\mu\text{m}$, o qual envolve emissão das moléculas ionizadas ($7.7\mu\text{m}$ e $6.2\mu\text{m}$) e neutras ($8.6\mu\text{m}$ e $11.3\mu\text{m}$; ver figuras 6–9 da Ref. [12]). Importante ressaltar que quando é analisado amostra das galáxias AGNs a dispersão nas propriedades das moléculas de PAHs em galá-

xias com SMBHs e galáxias com formação estelar aumenta e não existe uma clara separação das propriedades das moléculas orgânicas de PAHs entre AGNs e galáxias com formação estelar. Esses resultados podem ser investigado melhor com a nova geração de dados de maior qualidade espacial e espectral que serão disponibilizada pelo telescópio espacial James Webb (ver figuras 6–9 da Ref. [12]).

Sales et al (2010) mostram diagramas de diagnósticos com as moléculas de PAHs em AGNs e galáxias com formação estelar onde concluem que objetos com baixo potencial de ionização possuem valores menores para a razão de PAHs entre $7.7\mu\text{m}/8.6\mu\text{m} < 6$, ressaltando novamente uma indicação que as moléculas de PAHs podem possuir propriedades diferentes em galáxias com SMBHs [12].

Portanto, uma das principais conclusões do estudo da “AstroBioQuímica” de ambientes inóspitos como galáxias ativas, AGNs, é que de uma forma geral, as moléculas de PAHs presentes nos AGNs são maiores que em galáxias Starburst. Além disso, de acordo com a Ref. [44], os grandes valores de $7.7\mu\text{m}/8.6\mu\text{m}$ e $7.7\mu\text{m}/11.3\mu\text{m}$ indica que a maioria das moléculas nesses AGNs estão no estado ionizado.

Em suma, os resultados que podem ser concluídos através dos diagramas de diagnóstico usando as moléculas de PAHs e indicadores de potencial de ionização das fontes AGNs e formação estelar (Figura 3 e figuras 6–9 da Ref. [12]) apresentam uma clara evidência de que a fração de ionização e tamanho dessas moléculas aumentam de galáxias Starburst para AGNs. É importante ressaltar novamente que uma nova janela de oportunidade para avançar o conhecimento sobre a evolução do material orgânicas ao longo da evolução do Universo poderá ser acessadas ao passo que os dados do telescópio espacial James Webb forem observados, assim, os resultados derivados essa amostra de galáxias poderá mostrar suporte para futuras interpretações do estudo da “AstroBioQuímica” (mais resultados podem ser acessados nas Refs. [12–14, 17, 33, 34, 45]).

4 Evolução das características dos PAHs ao longo da evolução do Universo

Como já mencionado, a variação nos perfis das bandas de PAH pode estar relacionada com a po-

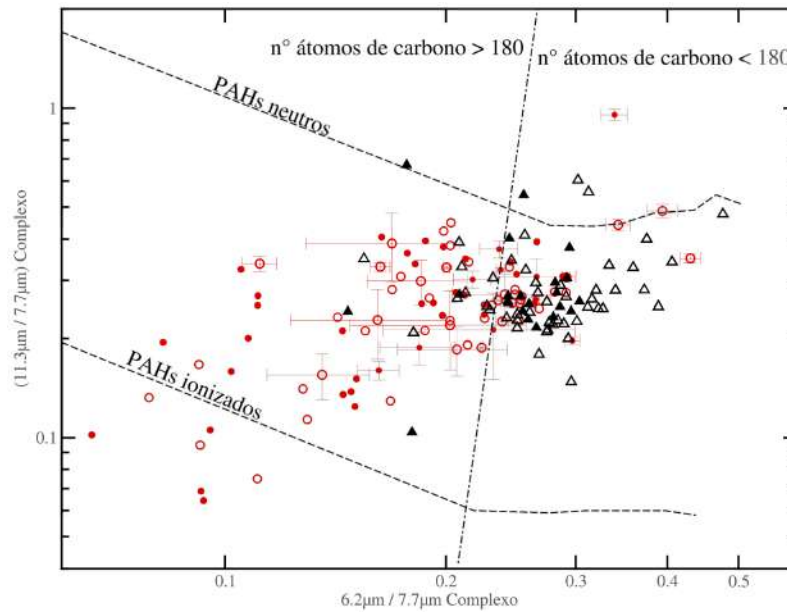


Figura 3: Diagrama de diagnóstico da razão $6.2\mu\text{m}/7.7\mu\text{m} \times 11.3\mu\text{m}/7.7\mu\text{m}$. As linhas pontilhadas representam as intensidades teóricas dos PAHs ionizados e neutros da Ref. [40]. A linha traço-ponto mostra a posição onde a molécula de PAH tem 180 átomos de carbono. Os triângulos vazios representam as regiões H II+LINER da amostra das Refs. [8,11], os triângulos preenchidos representam as galáxias Starburst da Ref. [37], os círculos preenchidos e vazios são Seyfert 1 e Seyfert 2 da amostra desse trabalho e da amostra da Ref. [36]. As barras de erros são apresentadas para os 15 novos AGNs e representam bem os erros da amostra total.

pulação molecular emissora. A Figura 4 mostra uma representação dessa variação na banda de PAH em $6.2\mu\text{m}$ pelo redshift de uma sub-amostra de galáxias com emissão dominada por Starburst, retirada do catálogo de espectros já tratados do Spitzer/IRS ATLAS [46]. Após a subtração do contínuo e do ajuste da banda de $6.2\mu\text{m}$, os comprimentos de onda centrais foram distribuídos ao longo dos respectivos redshifts, juntamente com a separação das classes de Peeters.

Como é possível ver na Figura 4, a classe A de PAHs é dominante até nos redshifts mais elevados. Conseqüentemente, pode-se perceber que além de uma evidente presença da emissão de PANHs ao longo da evolução do Universo ($z < 2$), também, é notório que os PANHs estão presentes na maioria das galáxias dominadas por Starburst. Esse tipo de análise pode ampliar o censo do nitrogênio no Universo, uma vez que PANHs representariam um reservatório adicional desse elemento, em condições de densidade e temperaturas distintas daquelas da fase gasosa e em gelos (mais informações desse estudo podem ser vistas nas Refs. [33,34,45]).

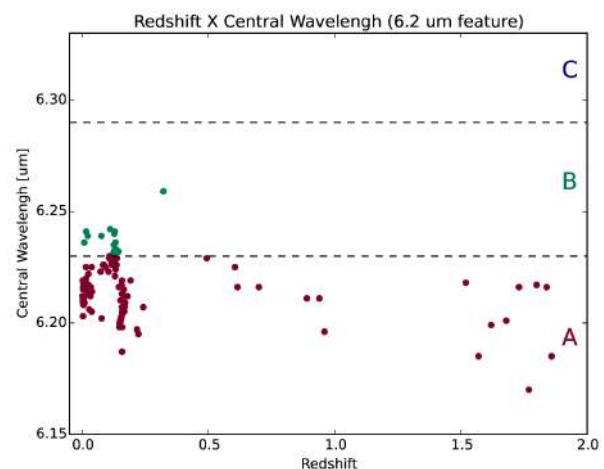


Figura 4: Gráfico do comprimento de onda central da banda de $6.2\mu\text{m}$ pelo redshift das fontes. Os espectros foram extraídos da amostra do Spitzer/IRS ATLAS [46] de galáxias com emissão dominada por Starburst. As linhas tracejadas pretas mostram o limite entre as três classes de Peeters. Classe A – cor de vinho; Classe B – verde; e Classe C – azul, que não possui representantes [45].

Agradecimentos

Dinalva A. Sales agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

Sobre as autoras

Dinalva Aires de Sales (dinalvaires@gmail.com) é Graduada em Matemática e Mestre em Física e Astronomia pela Universidade do Vale do Paraíba, e Doutora em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde também atuou como pós-doutoranda. Foi NASA Postdoctoral Fellow no Rochester Institute of Technology (2012/2013). Tem experiência na área de astrofísica, atuando principalmente nos seguintes temas: núcleo ativo de galáxia, galáxias em interação, moléculas complexas, espectroscopia e imageamento. Atualmente é professora adjunta do Instituto de Matemática, Estatística e Física (IMEF) da Universidade Federal do Rio Grande (IMEF-FURG). Foi Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Física (PPG-Física) do IMEF-FURG (2019-2021) e atualmente é Coordenadora de Bolsas Institucionais da Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPEP) da FURG.

Carla Martinez Canelo (camcanelo@gmail.com) é integrante do Grupo de Pesquisa INOVENTER CNPq da Universidade Federal do Rio Grande. É Graduada em Física pela Universidade de São Paulo, Mestre e Doutora em Astronomia pela mesma instituição. Possui experiência na área de astronomia, com ênfase em astrobiologia, astroquímica e em divulgação científica.

Referências

- [1] P. Ehrenfreund et al., *Experimentally Tracing the Key Steps in the Origin of Life: The Aromatic World*, *Astrobiology* **6**, 490 (2006).
- [2] A. Li, *Interaction of Nanoparticles with Radiation*, in *Astrophysics of Dust*, editado por A. N. Witt, G. C. Clayton e B. T. Draine (2004), vol. 309 de *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 417. [ArXiv: astro-ph/0311066](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0311066).
- [3] A. G. G. M. Tielens, *Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Molecules*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **46**, 289 (2008).
- [4] R. Genzel et al., *What Powers Ultraluminous IRAS Galaxies?*, *Astrophysical Journal* **498**, 579 (1998). [ArXiv:astro-ph/9711255](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9711255).
- [5] D. Lutz et al., *The Nature and Evolution of Ultraluminous Infrared Galaxies: A Mid-Infrared Spectroscopic Survey*, *Astrophysical Journal Letters* **505**, L103 (1998). [ArXiv: astro-ph/9806270](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9806270).
- [6] D. Rigopoulou et al., *A Large Mid-Infrared Spectroscopic and Near-Infrared Imaging Survey of Ultraluminous Infrared Galaxies: Their Nature and Evolution*, *Astronomical Journal* **118**, 2625 (1999). [ArXiv:astro-ph/9908300](https://arxiv.org/abs/astro-ph/9908300).
- [7] Q. D. Tran et al., *Isocam-Cvf 5-12 Micron Spectroscopy of Ultraluminous Infrared Galaxies*, *Astrophysical Journal* **552**, 527 (2001). [ArXiv:astro-ph/0101187](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0101187).
- [8] J. D. T. Smith et al., *The Mid-Infrared Spectrum of Star-forming Galaxies: Global Properties of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emission*, *Astrophysical Journal* **656**, 770 (2007). [ArXiv:astro-ph/0610913](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0610913).
- [9] F. Galliano, *PAHs in Galaxies: their Properties and Evolution*, *astro-ph* (2006). [ArXiv: astro-ph/0610852](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0610852).
- [10] F. Galliano et al., *Variations of the Mid-IR Aromatic Features inside and among Galaxies*, *Astrophysical Journal* **679**, 310 (2008). [ArXiv:0801.4955](https://arxiv.org/abs/0801.4955).
- [11] K. D. Gordon et al., *The Behavior of the Aromatic Features in M101 H II Regions: Evidence for Dust Processing*, *Astrophysical Journal* **682**, 336 (2008). [ArXiv:0804.3223](https://arxiv.org/abs/0804.3223).
- [12] D. A. Sales, M. G. Pastoriza e R. Riffel, *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Emission Line Ratios in Active Galactic Nuclei and Starburst Galaxies*, *Astrophysical Journal* **725**, 605 (2010). [ArXiv:1010.2170](https://arxiv.org/abs/1010.2170).
- [13] D. A. Sales et al., *The Compton-thick Seyfert 2 Nucleus of NGC 3281: Torus Constraints*

- from the 9.7 μm Silicate Absorption, *Astrophysical Journal* **738**, 109 (2011). [ArXiv:1106.5731](#).
- [14] D. A. Sales et al., *Polycyclic aromatic hydrocarbon in the central region of the Seyfert 2 galaxy NGC 1808*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **429**(3), 2634 (2013). [ArXiv:1212.1357](#).
- [15] D. A. Sales et al., *An Embedded Active Nucleus in the OH Megamaser Galaxy IRAS16399-0937*, *Astrophys. J.* **799**(1), 25 (2015). [ArXiv:1411.1261](#).
- [16] O. Laurent et al., *Mid-infrared diagnostics to distinguish AGNs from starbursts*, *Astronomy and Astrophysics* **359**, 887 (2000). [ArXiv:astro-ph/0005376](#).
- [17] D. Ruschel-Dutra et al., *A mid-IR comparative analysis of the Seyfert galaxies NGC 7213 and NGC 1386*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **438**(4), 3434 (2014). [ArXiv:1401.1989](#).
- [18] A. Alonso-Herrero et al., *Nuclear 11.3 μm PAH emission in local active galactic nuclei*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **443**(3), 2766 (2014). [ArXiv:1407.1154](#).
- [19] A. Alonso-Herrero et al., *A mid-infrared spectroscopic atlas of local active galactic nuclei on sub-arcsecond resolution using GTC/CanariCam*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **455**(1), 563 (2016). [ArXiv:1510.02631](#).
- [20] T. Monfredini et al., *Destruction and multiple ionization of PAHs by X-rays in circumnuclear regions of AGNs*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **488**(1), 451 (2019). [ArXiv:1808.07626](#).
- [21] A. Omont, *Physics and chemistry of interstellar polycyclic aromatic molecules*, *Astronomy and Astrophysics* **164**, 159 (1986).
- [22] P. Ehrenfreund et al., *Astrophysical and astrochemical insights into the origin of life*, *Reports on Progress in Physics* **65**, 1427 (2002).
- [23] L. J. Allamandola, D. M. Hudgins e S. A. Sandford, *Modeling the Unidentified Infrared Emission with Combinations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, *The Astrophysical Journal* **511**, L115 (1999).
- [24] D. M. Hudgins e L. J. Allamandola, *The Spacing of the Interstellar 6.2 and 7.7 Micron Emission Features as an Indicator of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Size*, *Astrophysical Journal Letters* **513**, L69 (1999).
- [25] A. L. Mattioda, D. M. Hudgins e L. J. Allamandola, *Experimental Near-Infrared Spectroscopy of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons between 0.7 and 2.5 μm* , *Astrophysical Journal* **629**, 1188 (2005).
- [26] A. Li e B. T. Draine, *On Ultrasmall Silicate Grains in the Diffuse Interstellar Medium*, *Astrophysical Journal Letters* **550**, L213 (2001). [ArXiv:astro-ph/0012147](#).
- [27] C. W. Bauschlicher et al., *The NASA ames PAH IR spectroscopic database: Computational version 3.00 with updated content and the introduction of multiple scaling factors*, *The Astrophysical Journal Supplement Series* **234**(2), 32 (2018).
- [28] E. Peeters et al., *The rich 6 to 9 μm spectrum of interstellar PAHs.*, *Astronomy & Astrophysics* **390**, 1089 (2002). [ArXiv:astro-ph/0205400](#).
- [29] B. van Diedenhoven et al., *The Profiles of the 3-12 Micron Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Features*, *Astrophys. J.* **611**, 928 (2004). [ArXiv:astro-ph/0405098](#).
- [30] H. Andrews et al., *PAH Emission at the Bright Locations of PDRs: the grandPAH Hypothesis*, *Astrophys. J.* **807**(1), 99 (2015).
- [31] D. M. Hudgins, C. W. Bauschlicher, Jr. e L. J. Allamandola, *Variations in the Peak Position of the 6.2 μm Interstellar Emission Feature: A Tracer of N in the Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Population*, *Astrophys. J.* **632**, 316 (2005).
- [32] A. Vats et al., *Theoretical study of infrared spectra of interstellar PAH molecules with N, NH, and NH₂ incorporation*, *Publications of the Astronomical Society of Japan* **74**(1), 161 (2022). [ArXiv:2112.14453](#).

- [33] C. M. Canelo et al., *Variations in the 6.2 μm emission profile in starburst-dominated galaxies: a signature of polycyclic aromatic nitrogen heterocycles (PANHs)?*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **475**, 3746 (2018). [ArXiv:1708.07565](#).
- [34] C. M. Canelo et al., *Profile comparison of the 6-9 μm polycyclic aromatic hydrocarbon bands in starburst-dominated galaxies*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **507**(4), 6177 (2021). [ArXiv:2109.01641](#).
- [35] J. R. Houck et al., *The Infrared Spectrograph (IRS) on the Spitzer Space Telescope*, *Astrophysical Journal Supplement Series* **154**, 18 (2004). [ArXiv:astro-ph/0406167](#).
- [36] J. F. Gallimore et al., *Infrared Spectral Energy Distributions of Seyfert Galaxies: Spitzer Space Telescope Observations of the 12 μm Sample of Active Galaxies*, *Astrophysical Journal Supplement Series* **187**, 172 (2010). [ArXiv:1001.4974](#).
- [37] B. R. Brandl et al., *The Mid-Infrared Properties of Starburst Galaxies from Spitzer-IRS Spectroscopy*, *Astrophysical Journal* **653**, 1129 (2006). [ArXiv:astro-ph/0609024](#).
- [38] A. Hernan-Caballero et al., *Mid-infrared spectroscopy of infrared-luminous galaxies at $z \sim 0.5-3$* , *MNRAS* **395**, 1695 (2009).
- [39] A. Hernán-Caballero e E. Hatziminaoglou, *An atlas of mid-infrared spectra of star-forming and active galaxies*, *MNRAS* **414**, 500 (2011).
- [40] B. T. Draine e A. Li, *Infrared Emission from Interstellar Dust. I. Stochastic Heating of Small Grains*, *Astrophysical Journal* **551**, 807 (2001). [ArXiv:astro-ph/0011318](#).
- [41] H. Kaneda et al., *Properties of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Local Elliptical Galaxies Revealed by the Infrared Spectrograph on Spitzer*, *Astrophysical Journal* **684**, 270 (2008). [ArXiv:0805.3257](#).
- [42] M. J. O'Dowd et al., *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Galaxies at $z \sim 0.1$: The Effect of Star Formation and Active Galactic Nuclei*, *Astrophysical Journal* **705**, 885 (2009). [ArXiv:0909.2279](#).
- [43] L. K. Hunt et al., *The Spitzer View of Low-Metallicity Star Formation. III. Fine-Structure Lines, Aromatic Features, and Molecules*, *Astrophysical Journal* **712**, 164 (2010). [ArXiv:1002.0991](#).
- [44] C. W. Bauschlicher, Jr., E. Peeters e L. J. Allamandola, *The Infrared Spectra of Very Large, Compact, Highly Symmetric, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs)*, *Astrophysical Journal* **678**, 316 (2008). [ArXiv:0802.1071](#).
- [45] C. M. Canelo, *O Mundo Aromático – dos PAHs no meio interestelar às condições bióticas*, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP), Brasil (2016). Disponível em https://www.iag.usp.br/pos/sites/default/files/d_carla_m_canelo_corrigena.pdf, acesso em ago. 2022.
- [46] A. Hernán-Caballero e E. Hatziminaoglou, *An atlas of mid-infrared spectra of star-forming and active galaxies*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 500 (2011). [ArXiv:1101.4794](#).

GalileoMobile: inspirando jovens sob o mesmo céu

Diego Torres Machado*

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Resumo

O GalileoMobile é uma iniciativa internacional e itinerante de educação e divulgação científica que aproxima a Astronomia de jovens de países em desenvolvimento, principalmente em áreas com pouco acesso a programas de extensão ou divulgação científica. Neste artigo, um pouco da sua história é relatada, com ênfase nos projetos realizados em solo brasileiro e também em seu projeto mais recente, o Amanar.

Abstract

GalileoMobile is a non-profit, itinerant, science education initiative that brings modern Astronomy to young people in developing countries, especially in areas with little access to extension or scientific dissemination programs. In this article, its history is reported, with emphasis on projects carried out in Brazil and also on its most recent project, Amanar.

Palavras-chave: GalileoMobile, astronomia, divulgação científica.

Keywords: GalileoMobile, astronomy, science communication.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38812](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38812)

1 Introdução sobre a divulgação científica

A divulgação científica é definida por muitos autores como um conjunto de práticas e valores que visam despertar o interesse pela ciência. Não é um exercício de caráter individual, e sim dialógico, já que para se estabelecer uma comunicação é necessária que uma via de mão dupla seja estabelecida. Sendo assim, não há comunicação da ciência sem sociedade. Portanto, ela está no centro das mais importantes questões sobre a evolução da nossa sociedade no século XXI. Das mudanças climáticas à inteligência artificial e biomedicina, a ciência e a tecnologia estão desempenhando um papel cada vez mais relevante e decisivo em nossas vidas. Além disso, o papel dos cidadãos em se engajar em decisões democráticas sobre ciência e tecnologia é vital, pois tais desenvolvimentos afetam a população de modo geral. Este importante papel da ciência leva a questões como as seguintes: Como as pessoas entendem os desenvolvimentos científicos e tecnológicos? Como as necessidades e preocupações da sociedade podem ser incluídas no desenvolvimento da ciência e da tecnologia? Parece óbvio que a interação e a comunicação entre aqueles que produzem ciência e a

população em geral está no coração do problema.

Comunicar ciência de forma eficaz, no entanto, é uma tarefa complexa e uma habilidade adquirida. Além disso, as abordagens para comunicar ciência que serão mais eficazes para determinadas audiências e circunstâncias específicas, não são óbvias. Sobretudo quando ainda existe grande resistência por parte da própria comunidade científica em tornar suas descobertas acessíveis: uma justificativa comum é que o público é incapaz de entender a linguagem científica e que o conhecimento é demasiado complexo e para ser traduzido aos leigos. Os próprios divulgadores podem introduzir barreiras a uma comunicação eficaz, podem superestimar o que a maioria das pessoas sabe sobre um determinado assunto [1], bem como superestimar a eficácia de seu esforço [2].

Em um relatório da Academia Nacional de Ciências, Engenharia e Medicina estadunidense de 2017 [3], cinco objetivos amplos e sobrepostos para a comunicação científica foram identificados, cada um deles com demandas distintas sobre o conhecimento e as habilidades dos comunicadores de ciência e seus públicos. Esses objetivos abrangem uma ampla gama de motivos para a comunicação, desde informar o público até motivar as ações de indivíduos, grupos ou socieda-

*Em nome das equipes GalileoMobile e Amanar.

des: (i) compartilhar descobertas recentes e entusiasmo pela ciência, (ii) aumentar a apreciação pública da ciência, (iii) aumentar o conhecimento e compreensão da ciência, (iv) influenciar as opiniões, preferências políticas ou comportamento das pessoas, e (v) assegurar que uma diversidade de perspectivas sobre ciência mantidas por diferentes grupos são consideradas quando soluções para problemas sociais são buscadas.

2 A astronomia na sociedade e na divulgação científica

As descobertas astronômicas cativam a imaginação humana ao se conectar a questões profundas e antigas sobre nossas origens e a natureza do universo em que vivemos. Esse amplo interesse pela astronomia pode ser explorado não apenas para aumentar o conhecimento e a compreensão da parte dos estudantes e do público, mas também para iluminar a natureza da ciência, bem como seu poder e limitações na formação de nosso futuro.

Talvez com a exceção da medicina, nenhuma outra disciplina científica viu suas novas realizações aparecerem com tanta frequência nas primeiras páginas de jornais, capas de revistas, TV, rádio, internet, entre outros meios de comunicação. O apelo natural e a popularidade da astronomia, de fato, ressaltam as responsabilidades dos astrônomos em garantir que o público seja mantido a par dos avanços mais recentes e possa apreciar sua relevância dentro do contexto mais amplo das ciências naturais.

Pode-se, então, trabalhar a astronomia a partir dos diferentes interesses que desperta, por exemplo: o seu apelo científico e o campo das ciências da natureza e matemática; a sua inserção nas diferentes culturas e o campo social e histórico; o seu apelo estético e o campo das artes; a origem de nossa existência cósmica e o campo filosófico.

Além disso, nas salas de aula, a astronomia se torna uma poderosa alternativa ao método experimental, introduzindo as observações, que são de extrema importância como parte do método científico. Da mesma maneira, ela pode ser usada para ilustrar diversos conceitos em física: gravitação, relatividade, todos os aspectos da luz em sua forma visível e seu espectro, geografia, entre outros. Ao aprender sobre espaço sideral, o estudante desenvolve habilidades que são fundamen-

tais para o aprendizado de outras disciplinas [4,5]. Algumas dessas habilidades são: melhoria na capacidade de cálculos matemáticos, comparação ou classificação de objetos ou eventos, comunicação, experimentação, exploração, imaginação, raciocínio lógico, interpretação, manipulação de instrumentos e reconhecimento de preconceitos ou concepções alternativas.

Desta forma, práticas de divulgação científica na temática da astronomia, que trazem informações sobre as descobertas mais recentes do campo, são capazes não só de despertar o interesse de estudantes como também colaborar para que habilidades trabalhadas em contextos curriculares da educação formal sejam alcançadas.

3 O GalileoMobile

O GalileoMobile é uma iniciativa internacional e itinerante de educação e divulgação científica que aproxima a astronomia de jovens de países em desenvolvimento, principalmente em áreas com pouco acesso a programas de extensão ou divulgação científica. Ao organizar atividades relacionadas com a astronomia em escolas e aldeias, pretendemos fomentar a vontade de aprender através das maravilhas emocionantes do nosso universo enquanto trocamos diferentes visões culturais do cosmos. Da mesma maneira, incentivamos fortemente atividades de acompanhamento a longo termo através de formação dos professores, doação de telescópios e outros materiais didáticos.

O GalileoMobile também estende seu impacto globalmente por meio de constantes esforços de divulgação, bem como pela produção e difusão de documentários sobre as expedições do projeto, a fim de criar um sentimento de “unidade sob o mesmo céu”, sensibilizar para a diversidade das culturas humanas e, finalmente, inspirar iniciativas semelhantes. De modo geral, os objetivos do GalileoMobile são os seguintes:

- Incentivar a vontade de aprender e de pensar criticamente em jovens residentes de áreas afastadas dos grandes centros urbanos onde as atividades de divulgação científica são praticamente inexistentes.
- Fornecer às escolas e professores as ferramentas e o conhecimento necessário para que as atividades possam ser reproduzidas independentemente, com o objetivo de facilitar

a continuação do programa a longo termo, promovendo assim um desenvolvimento sustentável nas comunidades visitadas.

- Promover intercâmbios culturais pela exploração, lado a lado da ciência moderna, de conhecimentos astronômicos tradicionais do céu, reforçando a mensagem de paz e tolerância mútua.
- Inspirar jovens de todo o mundo a realizar iniciativas similares.

Concebido em 2008 por jovens astrônomos inspirados pelo ano internacional da astronomia (AIA2009), o projeto conta hoje com 14 membros e diversos colaboradores em todo o mundo. Muitas das expedições realizadas foram inicialmente motivadas pelo desejo de membros de levar o projeto em seu país de origem. Desde sua criação, têm sido organizadas expedições em diversos países: Chile, Bolívia e Peru (2009), Bolívia (2012), Índia (2012), Uganda (2013), Bolívia e Brasil (2014), Colômbia (2014), Chile (2017), Chipre (2018) e Argélia (2019). Mais de 16000 estudantes, 1500 professores e 2600 residentes das comunidades foram atingidos pelas ações do GalileoMobile nos últimos 13 anos, como podemos ver na Tabela 1.

As expedições promovidas pelo GalileoMobile são exclusivamente realizadas através de editais de financiamento público, pelo apoio dos institutos de pesquisa aos quais os membros da coordenação e colaboradores são afiliados, ou ainda pela modalidade financiamento coletivo (*crowdfunding*). Por tratar-se de financiamentos públicos, em sua grande maioria, o projeto opta por visitar escolas públicas, institutos federais de ensino, comunidades assistidas por ONG's, órgão federais como a Funai e escolas indígenas, rurais e de apoio a crianças vulneráveis.

4 Cartilha de atividades

A Cartilha de Atividades GalileoMobile é o recurso didático fundamental do projeto. Durante as expedições, ela é usada como base tanto para realizar as atividades com os alunos das escolas (ensino fundamental e médio), como também para as oficinas de trabalho de professores. O conjunto de atividades que compõem a cartilha resultou originalmente de uma extensa pesquisa

através de várias fontes dedicadas ao ensino de física e astronomia [6,7]. Elas foram selecionadas e, posteriormente, adaptadas de acordo com os seguintes critérios. Em primeiro lugar, as atividades precisam ser práticas e lúdicas, para que os estudantes possam “aprender fazendo”, enquanto apreciam o lado divertido da ciência. Em segundo lugar, a maioria das atividades requerem interatividade entre os alunos e entre alunos e professores, a fim de fomentar o sentimento de “aprender juntos sob um mesmo céu”. Em terceiro lugar, as atividades têm que usar apenas materiais de baixo custo e que sejam fáceis de encontrar, que sejam acessíveis em qualquer lugar do mundo. Este critério transmite a mensagem de que a experimentação científica e as descobertas podem ser feitas sem a necessidade de instalações caras e são, portanto, acessíveis a todos.

A cartilha de atividades está disponível no site GalileoMobile gratuitamente em cinco línguas (<https://www.galileomobile.org>). Detalhes sobre o desenvolvimento das atividades (faixa etária, duração, metodologia, material utilizado, objetivos do aprendizado e descrição da atividade) são claramente apresentados na cartilha. Na Figura 1 temos um exemplo de atividade realizada na comunidade Caiçara de Ponta Negra em Paraty, sul do estado do Rio de Janeiro. A atividade se divide em duas partes: num primeiro tempo, os alunos recriam os planetas do sistema solar com massinha ou argila em diferentes cores, a partir de um modelo onde o diâmetro terrestre tem 2 mm. Em seguida, a segunda etapa da atividade consiste em entender as distâncias interplanetárias considerando a mesma escala escolhida na primeira parte da atividade. Assim, tomando a distância Terra-Marte como 78×10^6 km, por exemplo, equivale a aproximadamente 13 m na nossa escala reduzida.

5 Projetos no Brasil

Como foi mencionado acima, o GalileoMobile tem realizado seus projetos em diversos países desde sua criação, dois deles acontecendo parcialmente no Brasil: os projetos BraBo e Constellation.

Tabela 1: Números dos projetos realizados pelo GalileoMobile.

Nome do projeto	Países	Ano	Estudantes	Professores	Público	Total
GalileoMobile bajo mismo cielo	Chile, Bolívia, Peru	2009	1800	600	600	3000
Pando: heart of the Bolivian Amazon	Bolívia	2012	960	50	-	1010
Khagol Rath	Índia	2012	1680	102	420	2202
In the Land of Beauty	Uganda	2013	4410	113	-	4523
BraBo: Astronomia na Amazônia	Brasil, Bolívia	2014	3305	427	381	4113
Between the stars and Bacatá	Colômbia	2014	500	15	300	815
Constellation	Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Peru	2015	2500	100	600	3200
Constellation - Rondônia	Brasil	2016	680	9	80	769
Columba-Hypatia	Chipre	2017	150	30	100	280
Amanar	Espanha / Argélia	2019	635	66	150	851
Total			16620	1512	2631	20763

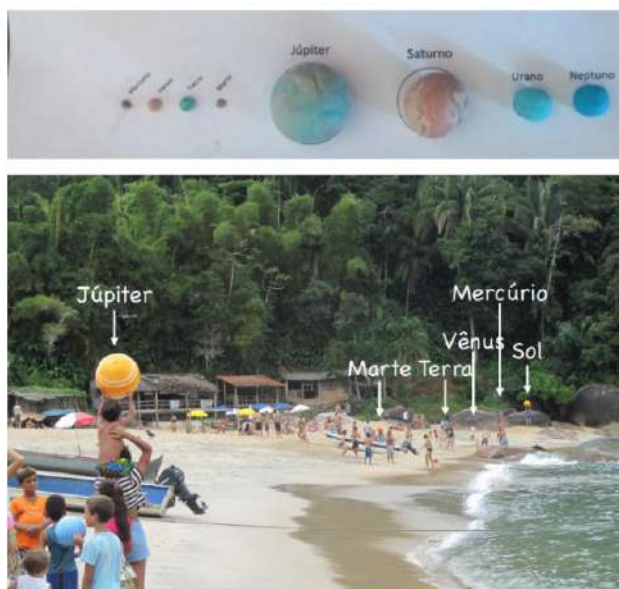


Figura 1: Atividades realizadas junto à comunidade Caiçara na praia de Ponta Negra, Paraty, estado do Rio de Janeiro. Figura superior: Sistema solar com o tamanho dos planetas em escala reduzida (raio da Terra = 1 mm). Figura inferior: Distâncias entre o Sol e os planetas mais próximos considerando a mesma escala. Créditos: Equipe GalileoMobile.

5.1 BraBo

Com base no sucesso do projeto piloto na Amazônia boliviana em 2012, o GalileoMobile decidiu organizar um projeto estendido para a região amazônica chamado BraBo - Astronomia na Amazônia [8]. Durante 5 semanas o GalileoMobile esteve no departamento boliviano de Pando e nos estados brasileiros vizinhos do Acre e Rondônia, cobrindo uma distância total de aproximadamente 1600 km durante o itinerário.

A escolha desta região não foi motivada ape-

nas por propósitos práticos: a riquíssima cultura astronômica das comunidades indígenas da região amazônica oferece uma oportunidade única de intercâmbio cultural, tornando a astronomia um eixo temático fundamental para desenvolver um importante diálogo entre diferentes tradições e visões de mundo. Sendo assim, o projeto visitou escolas regulares e indígenas nesta edição do projeto. Esta expedição se beneficiou dos recursos desenvolvidos pela equipe durante o AIA2009 na América do Sul (Chile, Bolívia, Peru) e da rede de contatos locais estabelecida durante a visita anterior ao distrito de Pando em 2012.

Além das atividades realizadas com os alunos, foram realizadas oficinas de formação de professores em colaboração com o projeto GTTP [7], o que permitiu a chegada das atividades a professores de escolas que não puderam ser incluídas no programa. Estes *workshops* foram realizados em Cacoal, Rio Branco (Brasil) e Cobija (Bolívia) e consistiram em um programa de um dia, incluindo palestras de astrônomos locais, observações do céu e instruções para atividades práticas. Foram doados telescópios, material de divulgação e cópias impressas de nosso manual de atividades para as escolas visitadas.

A expedição BraBo trouxe uma novidade interessante em relação às expedições anteriores: a realização de atividades com deficientes visuais. É natural pensar que a astronomia é uma ciência puramente visual. Observar constelações no céu noturno, admirar a Lua mudando de forma ao longo do mês, observar os anéis de Saturno com um simples telescópio, é sinônimo de praticar astronomia. No entanto, isso não significa que uma pessoa com deficiência visual não possa estudar



Figura 2: Atividades realizadas com deficientes visuais através de kits tácteis de astronomia. Créditos: Equipe GalileoMobile.

astronomia ou ser astrônoma.

Embora a luz visível nos ajude a aprender sobre o universo, objetos espaciais são estudados usando toda a gama do espectro eletromagnético. Ondas de rádio, micro-ondas, luz infravermelha e ultravioleta, raios gama e raios X são igualmente importantes, apesar de não podermos vê-los. Assim, da mesma maneira que usamos o tratamento de dados para observar comprimentos de onda fora do espectro visível, podemos usar outros sentidos, como o tato, por exemplo, para aprender conceitos de astronomia (Figura 2).

Foram visitadas duas escolas para crianças com deficiência visual em cada país, onde foram realizadas atividades usando um kit tátil astronômico desenvolvido pelo projeto *A Touch of the Universe* (<https://www.uv.es/astrokit>), um dos parceiros do GalileoMobile.

5.2 Constellation

O projeto Constellation estabeleceu em 2015 uma rede sul-americana de escolas comprometidas com a organização a longo prazo de atividades de divulgação astronômica entre seus alunos e comunidades locais. As atividades foram realizadas em 20 escolas localizadas em 6 países da América do Sul (Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Equador e Peru).

As escolas foram conectadas por meio de uma plataforma online e pelas mídias sociais, para que pudessem trocar suas ideias e experiências. O ciclo de atividades, denominado *Exploração Espacial*, foi planejado, escrito em forma de manual e traduzido em espanhol e português em março de 2015. Mais de 40 voluntários trabalharam com

os professores para planejar as atividades e cuidar da entrega dos telescópios e livros.

6 O projeto Amanar

Amanar: Sob o Mesmo Céu [9], é um projeto destinado a apoiar as comunidade de refugiados saarauís usando a astronomia para aumentar sua resiliência e engajamento, por meio de desenvolvimento de habilidades e atividades de autocapacitação.

A população saarauí vive em campos de refugiados localizados na parte mais seca do deserto do Saara desde 1975. Há mais de 40 anos, eles têm acesso limitado a recursos básicos e necessidades humanitárias urgentes, conforme identificado pelas agências da ONU [10]. Além disso, os jovens enfrentam uma vida sem perspectivas de futuro, com alta taxa de absenteísmo nas salas de aula e desemprego crescente. A agência da ONU para refugiados, ACNUR, enfatiza a importância de motivar os jovens a evitar as altas taxas de frustração nos campos, oferecendo programas STEM¹ para capacitação de estudantes de todas as idades.

Um resultado preocupante da estagnação do conflito saarauí é que as gerações mais jovens, nascidas e criadas nos campos, parecem duvidar que os esforços diplomáticos possam resolver a crise. Todos os anos, mais vezes estão visando uma solução militar para a situação de longa data com a qual cresceram. Embora a ideia de realizar um referendo e seguir um processo pacífico para a libertação do seu território ainda seja a opção preferida, o governo saarauí perde pouco a pouco a confiança nas Nações Unidas e tem dificuldade em acalmar a população jovem.

Neste contexto, o projeto Amanar pretende inspirar os jovens saarauís através da astronomia, bem como aumentar o interesse pela ciência. O projeto busca facilitar o desenvolvimento de habilidades científicas, como o pensamento crítico, por meio da realização de atividades práticas e observações do céu. Além disso, o programa promove oficinas de professores para estimular os educadores a utilizar a astronomia como ferramenta didática para contribuir com a melhoria da qualidade do ensino na região.

¹Sigla, em inglês, formada pelas iniciais das palavras Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática.

Trabalhando em colaboração com o Instituto de Astrofísica de Canárias (IAC), a Asociación Canaria de Amistad con el Pueblo Saharaui (ACAPS), e com o apoio da União Astronômica Internacional, o projeto cumpriu duas fases em 2019 envolvendo atividades tanto nas Ilhas Canárias quanto nos campos de refugiados nas proximidades de Tindouf, Argélia.

Separados por apenas 100 km, as Ilhas Canárias e o Saara Ocidental compartilham fortes laços históricos e culturais. Desde o início do conflito, a sociedade civil e política das Canárias manifestou repetidamente a sua solidariedade com o povo saarauí. Um exemplo é o programa Férias em Paz na Espanha (<https://acapscanarias.com/web/vacaciones>), uma iniciativa para trazer crianças saarauís para passar o verão com famílias espanholas com intuito de escapar das duras condições do deserto. Durante o programa, foram organizadas atividades práticas de astronomia e visitas a observatórios nas Ilhas Canárias para as crianças saarauís e suas famílias, como ilustrado na Figura 3a.

Em outubro de 2019, o projeto organizou atividades educativas e formação de professores nos campos de refugiados saarauís e doou kits de material educativo. As figuras 3b-3e ilustram algumas das atividades realizadas nos campos.

6.1 Estudos de etnoastronomia

O povo saarauí, de natureza nômade ou seminômade, desenvolveu através dos séculos um amplo conhecimento do céu. De fato, este conhecimento sempre desempenhou um papel importante na tradição cultural saarauí, pois os beduínos usavam estrelas e constelações para orientação, cronometragem, previsão de mudanças nas condições climáticas e até mesmo com propósitos religiosos: na ausência de instrumentos para medição do passar do tempo e mesquitas bem orientadas, as referências celestes se tornam ótimas aliadas. Da mesma maneira, durante os meses de verão a orientação era essencial para encontrar água antes que o calor se tornasse insuportável. No entanto, a maior parte dessa sabedoria ainda é transmitida oralmente, em forma de poemas que facilitam sua memorização.

Nos últimos anos, o Ministério da Cultura da República Árabe Saarauí Democrática (RASD) lançou, em colaboração com outras instituições espanholas, um projeto de recuperação da memó-

ria oral como um todo. A equipe Amanar se juntou a esta iniciativa no intuito de contribuir com a preservação do conhecimento astronômico através de entrevistas e transcrições sobre as tradições astronômicas (Figura 3f). Devido à transformação forçada do modo de vida tradicional, iniciada com a colonização espanhola do Saara Ocidental e reforçada pela situação de refúgio que se mantém hoje, este tipo de ação se torna cada vez mais essencial.

6.2 eAmanar

Vários desafios foram levantados à medida que a Pandemia do COVID-19 impôs o encerramento de ações humanitárias não essenciais nos campos de refugiados saarauís afetando, entre outras, a formação continuada de professores. Como resposta, o apoio aos professores foi garantido por meio de atividades remotas de desenvolvimento de habilidades e autocapacitação.

A escassez de computadores e as dificuldades de acesso a internet são realidades nos campos de refugiados. Assim, novas atividades foram compartilhadas pelo aplicativo WhatsApp, eficiente para baixa conexão de internet e de fácil uso via smartphone. O material de treinamento de professores do GalileoMobile foi adaptado para contar com imagens de média ou baixa resolução, além de explicações em áudio e texto. O eAmanar permitiu o apoio aos professores na introdução de conceitos astronômicos nas salas de aula e no uso eficiente da cartilha de atividades do GalileoMobile.

Finalmente, este programa piloto está atualmente testando a viabilidade do programa de treinamento online usando a astronomia em regiões sem conectividade confiável à Internet. Ações similares podem ser beneficiados pelas lições adquiridas pelo eAmanar.

6.3 Produtos áudio-visuais

Como frutos do projeto, estão sendo produzidos um documentário longa-metragem sobre a visita aos campos de refugiados e um documentário de realidade virtual para registrar a cosmovisão do povo saarauí. Outra inovação do projeto é a produção documentário interativo, uma nova forma digital que envolve o espectador em uma participação ativa combinando fotografia, texto, áudio, vídeo e animação permitindo criações co-



Figura 3: (a) Visita de jovens saarauís ao Instituto de Astrofísica de Canarias durante o programa *vacaciones en paz*. (b)-(e) Atividades realizadas nos campos de refugiados na proximidade de Tindouf, Argélia. (f) Recolhimento de relatos sobre a tradição astronômica saarauí. Créditos: Equipe Amanar.

laborativas e novos tipos de narrativas.

7 Conclusão

Vivemos em um mundo onde as tecnologias influenciam a nossa sociedade de maneira decisiva e muitas vezes irreversível. No entanto, nota-se ainda pouco diálogo entre a comunidade científica, a classe política, que o coloca em prática e a sociedade. Nessa medida, ações de divulgação científica se tornam cada vez mais essenciais para a consolidação da democracia através da participação popular nas decisões sobre o futuro da nossa sociedade. O amplo interesse despertado pela astronomia pode então ser utilizado neste sentido. Criado em 2008, o GalileoMobile tem como objetivo fomentar o raciocínio crítico em jovens residentes de áreas afastadas dos centros urbanos através de atividades práticas relacionadas à astronomia. Diversos países foram atingidos pelas ações do GalileoMobile, incluindo o

Brasil. O projeto mais recente está sendo realizado nos campos de refugiados saarauís na Argélia.

Sobre o autor

Diego Torres Machado (torres@cbpf.br) é doutor em Física de Astropartículas pela Universidade de Nantes, França (2013). Atualmente é pesquisador Pós-Doutorando do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) e membro da colaboração LHCb, onde estuda o fenômeno de violação da simetria CP através de decaimentos de mésons B^\pm em três hádrons. É membro da iniciativa de divulgação científica GalileoMobile desde 2016.

Referências

- [1] R. Nickerson, *How we know - and sometimes misjudge - what others know: Imputing one's*

- own knowledge to others*, *Psychological Bulletin* **125**, 737 (1999).
- [2] V. Chang et al., *Interns overestimate the effectiveness of their hand-off communication*, *Pediatrics* **125**, 491 (2010).
- [3] National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, *Communicating science effectively: A research agenda* (The National Academies Press, Washington DC, 2017).
- [4] S. G. Barros et al., *La astronomía en textos escolares de educación primaria*, *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas* **15**(2), 225 (1997).
- [5] A. Fraknoi, *Universe At Your Fingertips: An Astronomy Activity and Resource Notebook* (ERIC Clearinghouse, Washington D.C., 1996). Disponível em <https://eric.ed.gov/?id=ED399149>, acesso em ago. 2022.
- [6] Universiteit Leiden, *Universe Awareness: Inspiring every child with our wonderful cosmos*, Programa de divulgação científica. Disponível em <https://www.unawe.org/>, acesso em ago. 2022.
- [7] *Galileo Teacher Training Program*. Disponível em <http://galileoteachers.org/>, acesso em ago. 2022.
- [8] P. F. Spinelli, *Relatório sobre o projeto GalileoMobile BraBo (Brasil-Bolívia). Astronomia na Amazônia*, Relatório entregue ao CNPq (2014).
- [9] S. B. Herrera e J. R. González, *Under the same sky with Amanar*, *Nature Astronomy* **4**(5), 434 (2020).
- [10] World Bank Group, *Forcibly Displaced: Toward a Development Approach Supporting Refugees, the Internally Displaced, and Their Hosts* (World Bank, Washington, D.C., 2017).

Geofísica – Investigando o inacessível

Marcia Ernesto¹ e George Caminha-Maciel²

¹Universidade de São Paulo

²Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo

Este trabalho apresenta uma visão da Geofísica no que diz respeito à algumas manifestações físicas que trazem informações sobre a estrutura interna da Terra. Desta forma, são abordados alguns conceitos básicos sobre sismologia, o estudo das ondas elásticas liberadas por terremotos, geomagnetismo, o estudo do campo magnético gerado no interior da Terra, e gravimetria, a interpretação das anomalias gravimétricas produzidas pelas heterogeneidades nas estruturas internas da Terra.

Abstract

This work presents some aspects of Geophysics dealing with physical manifestations that bring information about the Earth's internal structure. In this way, some basic concepts about seismology, the study of elastic waves released by earthquakes, geomagnetism, the study of the magnetic field generated inside the Earth, and gravimetry, the interpretation of gravimetric anomalies produced by heterogeneities in the Earth's internal structures are addressed.

Palavras-chave: geofísica, sismologia, geomagnetismo, gravimetria

Keywords: geophysics, seismology, geomagnetism, gravimetry

1 Introdução

Embora o termo Geofísica possa ser entendido de forma simplista como Física da Terra ou Física aplicada ao estudo da Terra, esta ciência é muito mais ampla. É uma área multidisciplinar que lança mão de recursos da Física, Geologia, Química, Astronomia, Geodésia, Matemática Aplicada, Estatística para entender a formação e evolução do planeta Terra, mas também extensível a qualquer outro planeta. Até mesmo a Biologia, em alguns ramos de atividade mais recentes, faz alguma interface com a Geofísica.

A Geosfera inclui a chamada Terra sólida, a Atmosfera e a Hidrosfera. Estas últimas são de domínio das Ciências Atmosféricas e da Oceanografia, respectivamente, e são acessíveis para medições e experimentações diretas. O interior da Terra, entretanto, é quase completamente inacessível (Figura 1). Apenas uns poucos quilômetros de profundidade podem ser investigados diretamente, o que é pouco comparado aos 6371 km do raio terrestre. O poço mais profundo já perfurado, é o poço para observação científica com aproximadamente 12 km perfurados na região de Kola, na Rússia. Portanto, no momento, este é o limite prático de onde se pode extrair material

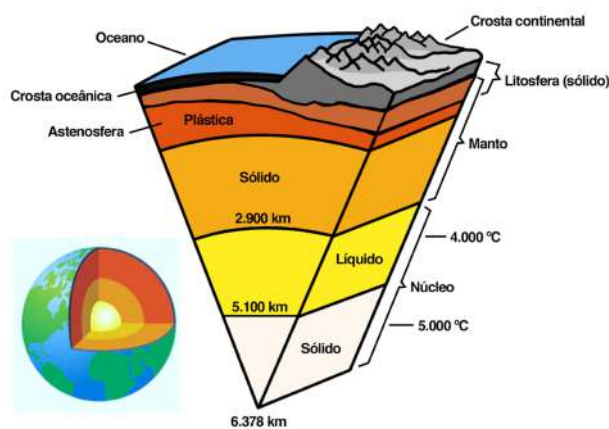


Figura 1: Representação esquemática das camadas internas da Terra. O corte em cunha mostra detalhes das camadas internas.

para análise ou enviar equipamentos para medidas.

Materiais de profundidades maiores são trazidos à superfície por erupções vulcânicas, porém, nem sempre bem preservados. Acredita-se que esse material provenha de profundidades não maiores que 100 km. Abaixo disso, o interior da Terra é totalmente inacessível. Portanto, quase toda a informação do interior terrestre só pode ser obtida de forma indireta. Para isso, todas as

manifestações físicas do planeta são observadas, analisadas e interpretadas: os campos de força criados pela Terra, como o gravitacional e o magnético, as diversas formas de energia interna liberada pela Terra, entre as quais, a energia térmica (calor liberado do interior da Terra e pela atividade vulcânica), trabalho mecânico (atividade sísmica, orogênese) e a energia do decaimento de isótopos radioativos naturais. Além disso, são importantes também, a resposta da Terra a excitações por fontes de energia externa naturais ou artificiais, tais como as forças e torques aplicados à Terra pela Lua e Sol, a indução eletromagnética causada pelas variações de campos magnéticos externos, terremotos naturais, explosões, etc.

Desta forma, dentro da Geofísica define-se áreas de estudo como o Geomagnetismo, a Sismologia, Geotermia, Geofísica Nuclear e Gravimetria. Essas áreas se desenvolveram a partir de conhecimentos adquiridos em tempos remotos, como é caso do Geomagnetismo. No século XIII, Pierre Pélerin de Maricourt (ou Petrus Peregrinus, como normalmente citado), engenheiro e militar francês estudou as propriedades do ímã e explicou o funcionamento da bússola. Este instrumento, inventado pelos chineses, provavelmente já existia numa forma rudimentar, desde 300 anos AC, de acordo com Joseph Needham (*Science and Civilization in China*). Os dados coletados pelos navegantes desde o século XV sobre os desvios da bússola em relação ao norte geográfico, são hoje importante base de dados para se reconstituir as variações do campo magnético terrestre. Mas o geomagnetismo somente se desenvolveu a partir das primeiras medições absolutas de intensidade realizadas por Gauss no século XIX.

O termo Geofísica foi empregado pela primeira vez por Julius Fröbel em 1834 e já em 1898, criou-se na Alemanha um Instituto de Geofísica ligado à Universidade de Göttingen. O século vinte foi marcante para a consolidação e desenvolvimento da Geofísica. Instituiu-se o Ano Internacional da Geofísica que representou o esforço conjunto de 27 países durante o período de 1^o de julho de 1957 a 21 de dezembro de 1958, concentrados em estudos de geomagnetismo, auroras, gravidade, física da ionosfera, sismologia, entre outros.

Como em outras ciências, a Geofísica também se subdivide em ciência pura e aplicada. A ciência pura, ou Geofísica Básica, investiga temas mais acadêmicos, como a origem e evolução da

Terra, a composição química dos materiais terrestres, a estrutura e dinâmica interna, geração do campo magnético, etc. A Geofísica Aplicada, por sua vez, dedica-se a problemas de interesse econômico e ambientais, como prospecção de recursos minerais, hídricos e geotérmicos, avaliação de risco sísmico, detecção de explosões nucleares, mapeamento geológico, entre outros. Os métodos da Geofísica são aplicados também ao estudo de outros corpos do Sistema Solar.

Todas as propriedades físicas mensuráveis do planeta podem ser associadas a um método de investigação. Desta forma, temos basicamente os seguintes métodos: gravimétrico, magnético, sísmico, elétrico e eletromagnético e geotérmico. Alguns métodos como a espectrometria de raios-gama (método radiométrico) e o sensoriamento remoto, detectam apenas atributos da superfície. Os métodos elétricos conseguem investigar, em geral, apenas algumas dezenas de metros e, em casos especiais, 100 – 300 metros. Portanto são considerados métodos de investigação rasa. Vamos tratar aqui, dos métodos que trazem informações mais profundas.

2 Sismologia

A propagação das ondas elásticas no interior da Terra depende dos parâmetros físicos dos materiais e rochas que a constituem. Os receptores sísmicos (sismômetros) instalados na superfície, captam o retorno do sinal produzido pela fonte de energia e que foi modificado (refletido ou refratado) pelas estruturas geológicas. O campo da Sismologia estuda o estresse e suas variações no interior da Terra ou de um planeta, particularmente aqueles causados pela ruptura de camadas geológicas ao longo de falhas e por atividade vulcânica. A energia liberada nesses processos é muito grande. A escala Richter mede a energia (E) liberada num terremoto relacionada com a magnitude. Por sua vez, a magnitude (M) é uma medida relativa baseada nos danos produzidos por um terremoto ou da intensidade com que ele se faz sentir num determinado local. A magnitude é, em geral, avaliada numa escala de 1 a 9, mas o maior terremoto conhecido teve magnitude de 9,5 e aconteceu no Chile em 1960. Na escala Richter, a energia liberada (E) é dada, em joules (J), pela equação

$$\log_{10} E = 4,4 + 1,5M. \quad (1)$$

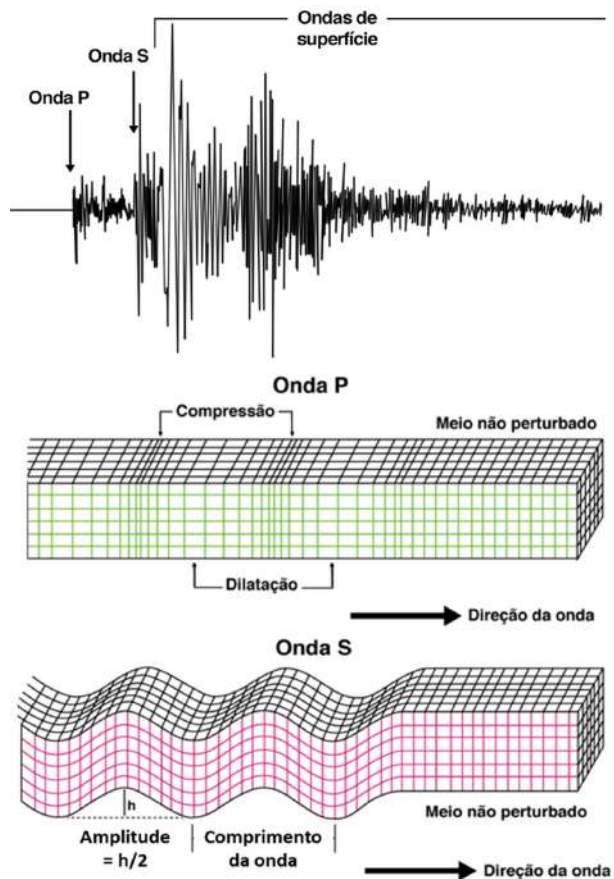


Figura 2: Representação de um sismograma mostrando a chegada de ondas *P*, *S* e ondas superficiais. Abaixo, representação dos movimentos das ondas *P* e *S*.

Desta forma, esse terremoto liberou $E = 4,46683 \times 10^{18}$ J. Outro terremoto ocorrido no Chile, desta vez em 2010, registrou 8,8 na escala Richter e a energia liberada foi de $E = 3,98107 \times 10^{17}$ J. Portanto, magnitude de menos de um ponto na escala Richter equivale a energia praticamente dez vezes maior! Para se ter uma ideia, essas energias equivalem à energia de milhares de bombas atômicas.

Os terremotos liberam energia na forma de diferentes ondas sísmicas que se propagam de modos diferentes. As chamadas ondas de corpo podem atravessar as camadas mais profundas da Terra e as ondas de superfície só se deslocam sobre a superfície, como as ondulações na superfície de um lago. As ondas de corpo são do tipo longitudinais (compressionais) ou transversais (cisalhantes). As ondas longitudinais são as primeiras a chegarem num ponto de observação e, por isso, são também designadas por ondas *P*. A seguir chegam as ondas transversais ou secundárias (*S*). As ondas *S* causam deformações como ilustrado

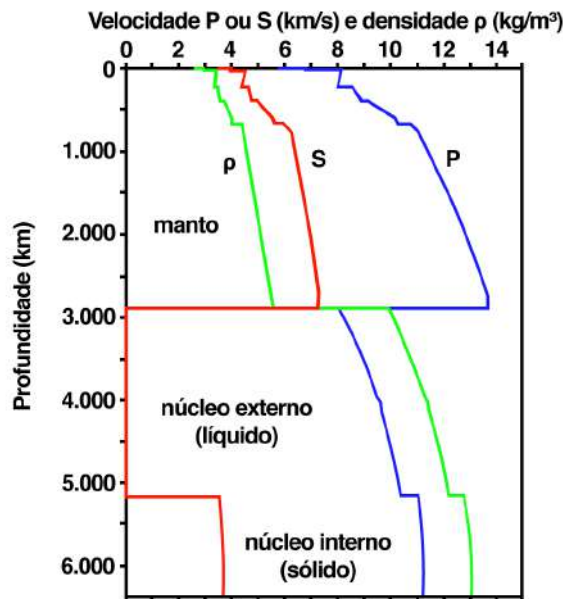


Figura 3: Variação de velocidade das ondas *P* e *S* em km/s e da densidade em função da profundidade. A descontinuidade entre o manto (sólido) e o núcleo externo (líquido) é marcada pelo desaparecimento das ondas *S*, que ressurgem no núcleo interno (sólido) [1].

na Figura 2 e, por isso não se propagam em meio líquido, mas as *P* se propagam em qualquer meio compressível.

As velocidades das ondas dependem da densidade e das propriedades elásticas do meio que elas atravessam. Desta forma, a velocidade da onda *P* é definida por

$$V_P = \sqrt{K + \frac{4}{3}\mu}, \tag{2}$$

onde K é o módulo de volume, ou seja, reflete a resistência de um material à compressão, e μ é o módulo de cisalhamento, ou seja, reflete a resistência à deformação ou cisalhamento. A velocidade das ondas *S* é dada por

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \tag{3}$$

Os parâmetros elásticos mencionados acima sofrem influência de vários fatores como a estrutura e a composição mineralógica das rochas, a porosidade e o grau de saturação por fluidos. A densidade é também afetada pela temperatura. Desta forma, as ondas sofrem variações de velocidade dependendo do meio que atravessam e da profundidade que alcançam. Desta forma, é possível definir um perfil de velocidades sísmicas do

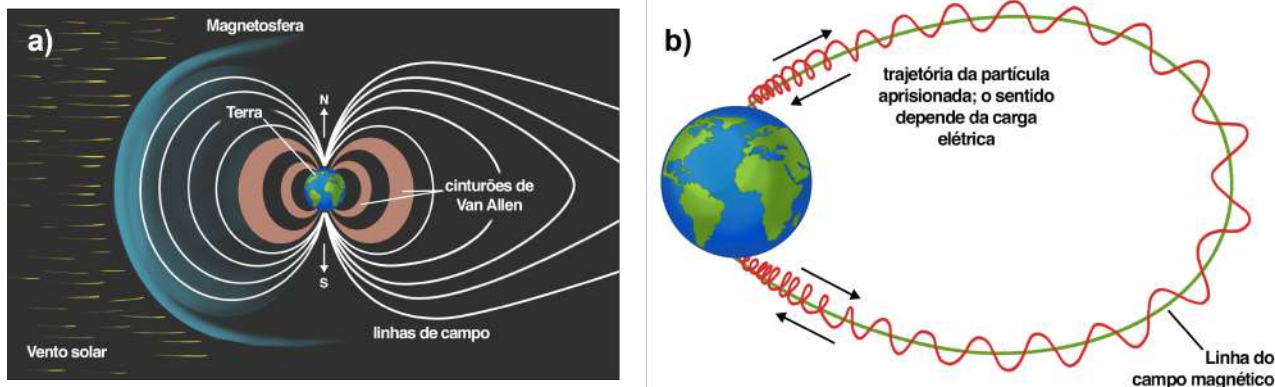


Figura 4: a) Representação da magnetosfera e da localização dos cinturões de Van Allen. b) Esquema representativo do aprisionamento das partículas ionizadas do vento solar pelas linhas de força do campo geomagnético.

interior da Terra e identificar as diferentes camadas.

Como se vê na Figura 3, à profundidade de 3.000 km, as ondas *S* desaparecem porque encontram uma camada em estado líquido (o módulo de rigidez é zero). É o núcleo externo, composto essencialmente por Ferro e Níquel e onde a densidade aumenta consideravelmente em relação ao manto que é composto por silicatos (minerais com Silício na composição). As ondas *S* voltam a aparecer no núcleo interno que tem a mesma composição do núcleo externo, porém, está no estado sólido.

Os mesmos princípios são utilizados nas investigações de outros planetas. Em 04/05/2022, a sonda *Insight*, da Nasa, detectou um abalo sísmico em Marte de magnitude 5,0, o maior até então registrado. Anteriormente, já haviam sido registrados abalos menores de magnitude 4,1 e 4,2. Os abalos mais intensos permitem fazer o reconhecimento das estruturas mais profundas do planeta.

A estrutura da Lua também já foi investigada por método sísmico, através dos dados coletados pela missão *Apollo* de 1969. A reanálise dos dados com técnicas modernas permitiu identificar um núcleo semelhante ao da Terra, rico em Ferro e com uma parte interna sólida com raio de aproximadamente 241 km e a parte externa, líquida, com cerca de 330 km de raio. Foi identificada também uma camada envolvendo o núcleo que tem em sua composição elementos mais leves como Enxofre, estando parcialmente fundido. Esta camada teria cerca de 482 km. Entretanto, isto não diferencia o núcleo da Lua e o da Terra, uma vez que o refinamento das pesquisas vai in-

corporando novos detalhes à estrutura da Terra, como a camada parcialmente fundida acima do limite manto-núcleo [2].

3 Magnetismo da Terra

A Terra está envolta em um campo magnético cuja origem está no seu próprio núcleo. Pelo menos 90% do campo total é gerado no núcleo externo e os restantes 10% são gerados na ionosfera, camada da alta atmosfera constituída por íons. A componente externa do campo é altamente variável devido à influência contínua do Sol, causando variações diurnas (períodos de 24 horas) ou ainda mais rápidas.

Embora o campo magnético de origem interna seja fraco, com intensidade total média da ordem de 55.000 nT, de acordo com o modelo internacional (IGRF), ele ocupa um volume muito grande, estendendo-se por vários raios terrestres acima da superfície. Esse invólucro magnético é chamado de magnetosfera, mas seus limites são variáveis porque o vento solar, fluxo de partículas ionizadas que viaja a 200 – 1.000 km/s, pressionam a magnetosfera no lado iluminado da Terra. No lado noite, ao contrário, as linhas de força são carregadas e estiradas, formando uma “cauda magnética” (Figura 4a).

As partículas do vento solar são aprisionadas e desaceleradas pelas linhas de força do campo magnético, fazendo com que a Terra seja protegida contra os efeitos da radiação mais energética. Esquemáticamente esse processo pode ser visualizado na (Figura 4b). As partículas desaceleradas são aprisionadas nos chamados cinturões de radiação ou cinturão de Van Allen, em homenagem ao

seu descobridor. Durante períodos de intensa atividade solar, ocorrem as chamadas tempestades magnéticas, que atingem toda a Terra, porque as partículas elétricas mais energéticas conseguem romper a barreira dos cinturões. Esse fenômeno causa grandes perturbações no campo magnético observado na superfície e interfere nas telecomunicações via satélite.

A interação das partículas elétricas com a alta atmosfera (entre 80 e 150 km) produz também as auroras polares. O impacto das partículas do vento solar, que têm energias de 1 – 15 keV, com os átomos da ionosfera, faz com que os elétrons sejam excitados e mudem de banda de energia. O excesso de energia será liberado na forma luminosa e produzirá uma cortina de cores. As auroras são observadas em altas latitudes, próxima aos polos, porque é para lá que as partículas do vento solar são canalizadas pelas linhas de força. O fenômeno ocorre em outros planetas do sistema solar e é indicativo da existência de um campo magnético próprio.

Na superfície da Terra o campo magnético observado é semelhante a um campo dipolar com os polos magnéticos próximos aos polos geográficos. Mas a distribuição da intensidade não é uniforme e há regiões onde a intensidade é maior ou menor que a média global. A mais notável é a região sobre o Atlântico Sul e América do Sul (Figura 5), onde a intensidade é cerca de um terço do campo médio, e é chamada de anomalia do Atlântico Sul, uma vez que quando foi descoberta, o foco encontrava-se nesse oceano. As anomalias positivas, ou seja, de maior intensidade, marcam os polos magnéticos da Terra e correspondem às regiões onde a inclinação magnética é de 90°. Esses polos estão a nordeste da América do Norte e da Antártica.

Assim como todos os elementos do campo da Terra, a anomalia se desloca para oeste e sua intensidade é variável, assim como sua forma. Atualmente, o campo magnético com um todo está enfraquecendo, mas essas flutuações são uma constante na história da Terra. Por outro lado, a diminuição de intensidade pode ser seguida por uma inversão de polaridade. A última inversão ocorreu há 780.000 anos.

Então cabe a pergunta: como sabemos que houve uma inversão de polaridade se não tínhamos observações diretas naquela época? Felizmente o magnetismo da Terra fica registrado nas

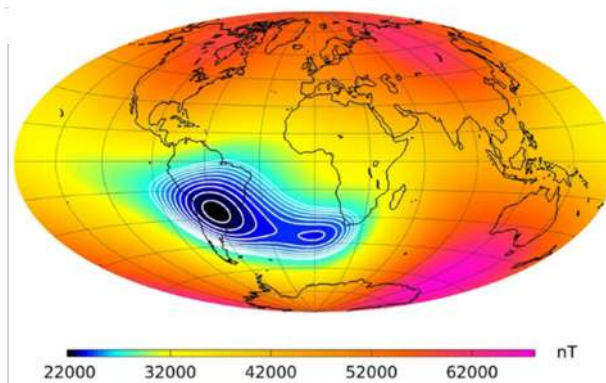


Figura 5: Anomalias geomagnéticas globais no ano de 2020. As regiões de maior intensidade correspondem aos polos magnéticos. Em azul, a anomalia negativa do Atlântico Sul. A intensidade F é dada em nano Teslas (nT). Créditos: Ref. [3].

rochas quando elas se formam e assim podemos recuperar essa informação. Essa área de estudo chama-se Paleomagnetismo.

As rochas têm em sua composição, minerais do grupo ferromagnético (mais precisamente ferromagnéticos) que têm a capacidade de adquirir magnetização remanente através da histerese, isto é, uma vez magnetizados, guardam a informação do campo magnetizante mesmo que este decaia a zero. Desta forma, pode-se recuperar em laboratório, a direção, sentido e intensidade do campo magnético da Terra desde o passado longínquo. Assim, sabemos que o campo todos os elementos do campo variam continuamente e que a polaridade do campo mudou inúmeras vezes, segundo um padrão aparentemente aleatório. Quando a polaridade muda, diz-se que ocorreu uma reversão e o campo se reorganiza rapidamente na polaridade oposta. Em geral, cada intervalo de polaridade dura milhares de anos até alguns milhões de anos e o tempo necessário para passar de um estado para o outro é de poucos milhares de anos.

Um campo magnético tão variável e com a capacidade de se regenerar, só pode ser produzido por um mecanismo complexo e que seja autossustentável, isto é, que disponha de fontes de energia capazes de mantê-lo em funcionamento. Esse mecanismo opera no núcleo externo da Terra e é chamado geodínamo. A liga fundida de Fe-Ni do núcleo externo deve atingir temperaturas da ordem de 4.500° – 5.500°C, formando correntes de convecção. Essas correntes, devido aos movimentos de rotação da Terra, são transformadas em espiras de material condutor que agem como eletroímãs gigantes (Figura 6).

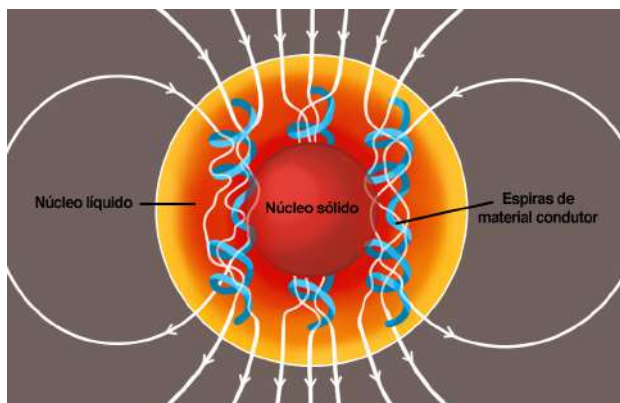


Figura 6: Representação esquemática de espiras de corrente elétrica no interior do núcleo externo capazes de gerar um campo magnético dipolar.

4 Gravimetria

A Gravimetria corresponde ao estudo do campo de gravidade da Terra e suas aplicações. Ela é a base da Geodésia Física que fornece informação acerca das dimensões, forma e massa da Terra. O estudo da ação gravitacional da Lua e do Sol sobre nosso planeta permite determinar como a massa se distribui no interior terrestre, como também sobre o estado de agregação dos materiais em vastas regiões do interior do planeta. Em escala local utiliza-se a estrutura fina da gravidade combinada com informações geológicas, para localizar, identificar e avaliar o potencial econômico de jazidas de minérios diversos, carvão, petróleo, sal e vários outros materiais de interesse econômico. A esta aplicação chamamos de prospecção gravimétrica.

Assim como em qualquer estudo de um fenômeno geofísico a determinação de características terrestres tais como a sua forma, suas interações com corpos do sistema solar e sua estrutura interna, só é possível através da medição do campo da gravidade terrestre. O campo da gravidade associa a cada ponto do espaço nas vizinhanças da Terra um vetor de aceleração da gravidade g . Esse vetor é caracterizado por sua intensidade g , denominada gravidade, e por sua direção, dita vertical local. A gravidade é medida por meio de gravímetros, ao passo que a direção da vertical local só é observável por métodos astronômicos, através dos quais ela é referida ao referencial celeste.

Um gravímetro é um tipo de acelerômetro que é usado para medir com precisão a força do campo gravitacional local, medindo a aceleração da gra-

vidade. Os gravímetros são equipamentos muito sensíveis construídos com uma plataforma inercial muito estável para balancear movimentos e vibrações que interferem nas medições. Existem dois tipos de gravímetros: absolutos e diferenciais ou relativos. Gravímetros absolutos medem a gravidade local em unidades absolutas (Gal). Os gravímetros absolutos são compactos e utilizados em campo. Eles funcionam medindo a magnitude do campo de gravidade total. Os gravímetros diferenciais medem pequenas variações de g entre dois pontos distintos. Assim, se a gravidade em um desses pontos for conhecida, pode-se determinar a gravidade no outro ponto.

O gravímetro de queda livre foi o primeiro instrumento gravimétrico a ser usado, e foi proposto por Galileu. É baseado na equação de queda livre de um corpo, onde o espaço percorrido Z é relacionado ao tempo de percurso t pela expressão

$$Z = Z_0 + V_0 t + \frac{1}{2} g t^2. \quad (4)$$

Registrando-se as posições Z_1, Z_2 e Z_3 em três instantes t_1, t_2 e t_3 , pode-se eliminar Z_0 e V_0 , obtendo g a partir das grandezas observadas com bastante resolução e de forma rápida. Entretanto, por serem de difícil transporte, são restritos a laboratórios e são fundamentais para se estabelecer uma rede de estações que fornecem valores absolutos para a calibração e padronização dos valores obtidos com gravímetros diferenciais ou relativos.

Os gravímetros diferenciais estão em contínua evolução e, através de montagens e materiais diversos, dispõe-se hoje de instrumentos bastante leves, relativamente baratos, de leitura rápida e de alta resolução (tipicamente 0,01 mGal), o que os torna ideais para levantamentos gravimétricos de precisão em escala local. A unidade de medida Gal (referência a Galileo Galilei), é a unidade de aceleração usada em gravimetria. O Gal é igual a 1 cm/s^2 . Como as variações de gravidade são muito pequenas, os submúltiplos são o mili-Gal (mGal) ou micro-Gal (μGal).

Sobre a superfície da Terra, a gravidade varia de ponto para ponto, devido à rotação e o achatamento da Terra, efeitos da Lua e do Sol, variações de altitude e efeitos da estrutura interna da Terra. Os diversos tipos de variações se superpõem, de modo que, quando o objetivo é o de se estudar variações da gravidade causadas pela estrutura da crosta ou do manto, é necessário eliminar todas as demais variações conhecidas.

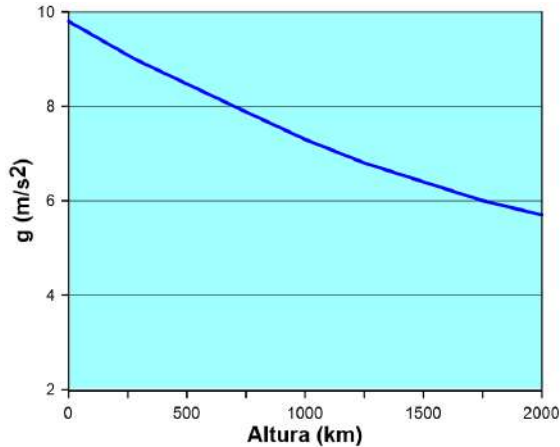


Figura 7: Variação da gravidade em relação à altura acima do nível do mar.

A variação de maior amplitude é a latitudinal, causada pela rotação e achatamento terrestre, e que é descrita pela Fórmula Internacional da Gravidade, padronizada pela União Internacional de Geodésia e Geofísica. Essa fórmula expressa a gravidade de referência em mGal, ao nível do mar e em função da latitude Φ ,

$$g(\phi) = 978031,8 + 0,0053204 \text{ sen}^2 \phi - 0,0000058 \text{ sen}^2(2\phi). \quad (5)$$

As variações da gravidade devido à ação da Lua e do Sol são deduzidas a partir da Lei da Gravitação Universal e da Segunda Lei de Newton,

$$g = \frac{GM}{(R + h)^2}. \quad (6)$$

Nas proximidades da Terra, ou de qualquer outro planeta, a distância é desprezável comparada com a massa do planeta, tornando assim, a aceleração aproximadamente constante.

Quando se eliminam as variações descritas acima, o que resta é a variação devida à estrutura da crosta e do manto. Essa variação, denominada de anomalia gravimétrica, corresponde ao g previsto pela fórmula internacional da gravidade, mais as correções de maré, topografia ou altitude e outras.

As correções de altitude são duas: a correção de ar-livre, ou de Faye, e a correção de Bouguer. A primeira leva em conta que g diminui quando o gravímetro é afastado da Terra (Figura 7). Então, uma correção de 0,3086 mGal/m é adicionada para compensar a variação do campo gravitacional com a altitude acima do nível do mar ,

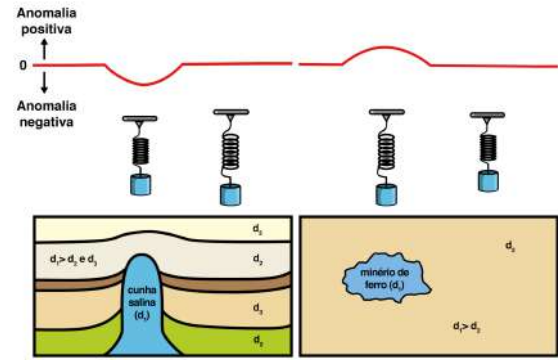


Figura 8: Anomalias positivas e negativas de gravidade geradas em duas situações diferentes, em que há contrastes de densidade.

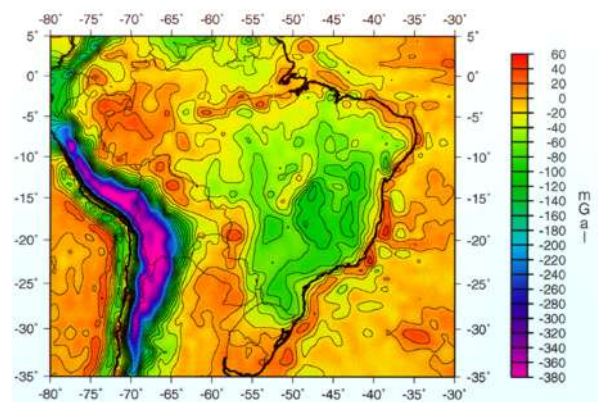


Figura 9: Anomalias positivas e negativas de gravidade geradas em duas situações diferentes, em que há contrastes de densidade. Créditos: Ref. [4].

assumindo que exista somente ar entre a estação de medida e o nível do mar.

A diferença entre o valor real e o valor previsto da anomalia de gravidade, deve-se à diferença de densidade entre a Terra real e o modelo de referência, em qualquer lugar abaixo do ponto de medida. Quando a densidade é desconhecida, costuma-se usar o valor $\rho = 2,67 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, que é a média para as densidades da crosta superior. Neste caso, podemos considerar a anomalia Bouguer sendo: $\delta g_B = 0,1119h \text{ mGal}$.

As anomalias observadas recebem nomes em função das correções que foram usadas no seu cálculo. A intensidade da anomalia pode variar de valores negativos a positivos, representando as variações de densidade (Figura 8). Quanto mais denso o corpo rochoso, maior será a anomalia positiva e vice-versa. As anomalias gravimétricas de uma região são representadas usualmente na forma de um mapa de isolinhas (ou variação em cores), como na Figura 9.

Pela inspeção visual de um mapa gravimétrico, podemos classificar as anomalias em locais, as que possuem dimensões de até dezenas de km, e as regionais, com dimensões de até milhares de quilômetros. Todas as anomalias gravimétricas são causadas por variações de densidade do material que constitui o interior da Terra, de modo que a interpretação consiste em determinar a distribuição de densidade interna que melhor explicar a anomalia observada. As anomalias com origem na crosta superior têm extensão típica de até algumas dezenas de km, e são causadas por distribuições heterogêneas de rochas com densidades distintas.

Uma observação importante a se fazer em relação ao mapa gravimétrico da Figura 9 é a existência de anomalias negativas ao longo da cadeia Andina. Com base na definição da anomalia gravimétrica de Bouguer, é de se esperar que essas anomalias teriam valores positivos e negativos, dependendo tão somente dos corpos de densidade variável presentes no interior da crosta terrestre. Por outro lado, as anomalias de ar-livre deveriam assumir sistematicamente valores positivos em regiões de maior altitude, uma vez que nesse cálculo não é levado em conta o efeito gravitacional do relevo topográfico.

Medidas gravimétricas tomadas em diferentes continentes e sob diferentes condições de relevo, revelam que de fato as anomalias de ar-livre apresentam uma nítida correlação positiva com o relevo topográfico, sendo mais positivas em regiões mais altas. No entanto observa-se também uma forte correlação negativa entre as anomalias de Bouguer e o relevo topográfico, nas regiões em que a topografia está associada a feições estruturais de grande porte, tais como grandes cadeias de montanhas e dorsais oceânicas, como mostrado na Tabela 1.

Para a região dos Alpes, onde se registram valores negativos para as anomalias de Bouguer, podemos supor que a densidade dos materiais geológicos formadores dessas montanhas seja menor que o valor médio da crosta ($2,67 \text{ g/cm}^3$). Admitindo que seja essa a causa da anomalia de Bouguer negativa, calculou-se a densidade média desses materiais geológicos impondo que a anomalia de Bouguer seja nula. O resultado foi um valor de densidade ($0,82 \text{ g/cm}^3$) menor do que a da água!

A explicação para esse fenômeno foi dada em

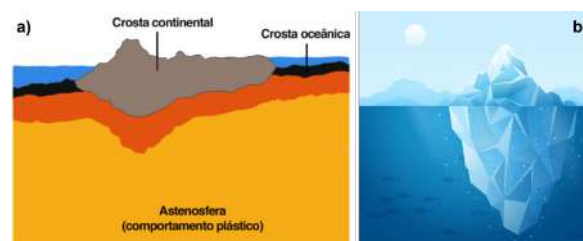


Figura 10: (a) Isostasia e flexura litosférica com deslocamento do manto devido à carga das rochas da crosta continental. (b) Um iceberg tem um volume submerso maior que o volume exposto e desloca grande quantidade de água. Fonte: [freepik](https://www.freepik.com).

Tabela 1: Valor médio da anomalia de Bouguer em regiões de relevo distinto [5].

Localização das estações gravimétricas	Anomalia Bouguer típica (mGal)
áreas costeiras	+17
áreas não montanhosas	-28
áreas montanhosas	-110

1885 por George Airy e também por John Henry Pratt. Tanto a hipótese de Airy como a de Pratt assumiam um balanceamento hidrostático local. Esse balanceamento foi posteriormente denominado isostasia por Clarence Dutton em 1885. Quando uma grande quantidade de sedimentos é depositada em uma certa região, o imenso peso desses sedimentos produzirá um afundamento da crosta (Figura 10a).

Podemos fazer uma analogia com um iceberg que flutua sempre com uma significativa porção de sua massa abaixo da superfície da água (Figura 10b). Se o iceberg receber mais massa (neve) ele afundará mais. Contrariamente, se houver perda de massa pelo degelo, o iceberg subirá e irá expor uma parte que antes ficava mergulhada na água. A litosfera terrestre flutua sobre a astenosfera.

Quando grande quantidade de material é acumulado numa região, esta irá afundar no material plástico do manto, até que seu peso seja equilibrado pelo empuxo de Arquimedes (isto é, a cadeia montanhosa passa a flutuar sobre o substrato mais denso). Dessa forma, a compensação da massa do relevo visível se dá à custa da falta de massa criada pelo deslocamento de parte do material mais denso do substrato, dando lugar ao material menos denso da crosta.

A explicação acima leva ao entendimento de que a astenosfera (região do manto abaixo da li-

tosfera) embora sendo sólida, reage de forma plástica ou dúctil em longos intervalos de tempo. Da mesma forma, a litosfera sendo rígida, pode reagir de forma não-rígida quando flexiona sob o peso de uma carga e se recupera elasticamente quando a carga é removida. Este movimento é atualmente observável na Escandinávia, através de um soerguimento mensurável devido ao fim do último período glacial.

Sobre os autores

M. Ernesto (mernesto@usp.br) possui graduação em Física (1973) pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP), doutorou-se (1985) em Geofísica pela Universidade de São Paulo (USP). Realizou estágios de pós-doutorado nas Universidades de Edimburgo (Reino Unido) e Munique (Alemanha). É Professora Titular no Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Espaciais (IAG/USP) e desenvolve pesquisas na área de geomagnetismo e paleomagnetismo.

G. Caminha-Maciel (caminha.maciel@ufsc.br) possui graduação (2003) e doutorado (2010) em Geofísica pela Universidade de São Paulo. Realizou estágios de pós-doutorado no Observatório Nacioanl (ON/MCTI, RJ) e na Universidade do Havaí (EUA). Foi Professor Adjunto na UNI-PAMPA e atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Principais temas de pesquisa: geomagnetismo, métodos eletromagnéticos e processamento de sinais.

Referências

- [1] A. M. Dziewonski e D. L. Anderson, *Preliminary reference Earth model*, *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **25**(4), 297 (1981).
- [2] J. W. Hernlund e A. M. Jellinek, *Dynamics and structure of a stirred partially molten ultralow-velocity zone*, *Earth and Planetary Science Letters* **296**(1), 1 (2010).
- [3] C. C. Finlay et al., *The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly*, *Earth, Planets, and Space* **72** (2020).
- [4] N. de Sá, *Modelos estatísticos e representação integrada do campo de gravidade no Brasil*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (1989).
- [5] G. Garland, *Introduction to geophysics: Mantle, core, and crust* (W.B. Saunders & Co, Philadelphia, 1979).

A origem dos elementos da Tabela Periódica

Jorge E. Horvath

Universidade de São Paulo

Resumo

Apresentamos neste artigo um panorama da nucleossíntese cosmológica, estelar e catastrófica que leva a povoar a Tabela Periódica do elementos criada por D. Mendeleev há mais de um século.

Abstract

We present in this article a broad overview of nucleosynthesis of cosmological, stellar and catastrophic origin, which lead to populate the Periodic Table of elements created by D. Mendeleev more than a century ago.

Palavras-chave: origem dos elementos, astrofísica, cosmologia.

Keywords: origin of the elements, astrophysics, cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38513](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38513)

1 Introdução

A extraordinária síntese e classificação atingida por Dmitri Mendeleev no final do século 19 é apresentada e discutida em todos os colégios do mundo. Mendeleev conseguiu um ordenamento dos elementos químicos, posteriormente justificado por Pauling e outros com a aplicação da mecânica quântica que continua vigente e imprescindível. Com o tempo, novos elementos sintetizados em laboratório, algumas vezes com vidas médias minúsculas, foram adicionados a Tabela Periódica que contém nada menos que todos elementos químicos do universo.

O que não é tão discutido (de fato, nem é mencionado na maior parte das vezes) é a questão crucial da origem destes elementos [1]. Com efeito, desde que estão presentes na Natureza, devem haver processos naturais que os produzam, e sua abundância relativa no Cosmos, no Sistema Solar e na crosta terrestre onde vivemos deve ser também explicada de forma abrangente. Esta última afirmação não é nada óbvia. Por exemplo, o berílio no Sistema Solar é ordens de grandeza mais abundante que no Cosmos como um todo, o silício na crosta da Terra é muito comum, mas não é este o caso no meio interestelar. Há inúmeros problemas e detalhes a serem explicados até atingirmos uma compreensão completa da Tabela Periódica e da origem dos seus elementos.

Neste sentido, as fontes dos elementos quími-

cos de origem astrofísica e cosmológica estão hoje melhor estudadas e caracterizadas, já que uma parte importante desta tarefa é a de separar e avaliar cada processo e quantificar sua contribuição. Houve avanços significativos nas últimas décadas que permitiram, se não explicar ainda detalhadamente cada processo e seu desfecho quantitativo, pelo menos oferecer uma descrição tentativa e caminhos para aprofundar o conhecimento de cada um deles.

Desde uma perspectiva cósmica precisamos distinguir os processos que produziram elementos na evolução cosmológica (nucleossíntese primordial) daqueles que produzem núcleos a partir de condições mais locais (nucleossíntese estelar). O último grupo, por sua vez, compreende uma nucleossíntese própria da evolução das estrelas, mas também processos explosivos no fim da evolução estelar, e além dela, que somente agora começam a ser confirmados e revelados. A composição destes vários processos deve explicar as abundâncias observadas, como afirmamos anteriormente.

2 Nucleossíntese do Big Bang

Há um século atrás, os pioneiros da ideia da cosmologia moderna começaram a se preocupar pela origem dos elementos tal como hoje a entendemos. Uma das primeiras ideias foi a do “ovo cósmico” ou “átomo primordial” de Lemaître

tre, em 1931. Lemaître raciocinou que o Universo inteiro estava inicialmente num estado ultracompacto [2], e que os elementos mais leves que conhecemos se formaram pelos decaimentos radioativos desse “átomo primordial”. Além do “ovo” ser de um dos mitos cosmogônicos mais comuns, a proposta de Lemaître foi talvez a primeira tentativa racionalista moderna de responder a questão da origem dos elementos.

A retomada da questão teve um protagonista fundamental, o físico ucraniano George Gamow. Num trabalho célebre [3] no qual Hans Bethe foi incluído para que as iniciais sejam $\alpha\beta\gamma$, Alpher, Gamow e Bethe propõem que os núcleos primordiais foram montados “de baixo para cima”, pela adição sucessiva de nêutrons. Veremos agora como é que a expansão do Universo entra de forma crucial e até onde podem aparecer núcleos pesados.

Segundo as ideias e evidências modernas do Big Bang como contexto cosmológico, a nucleossíntese primordial pode ter produzido a maior parte dos elementos mais leves, mas não contribuiu para criar núcleos com número de massa $A > 8$. Vejamos agora o porquê desta afirmação.

Muito cedo na história do Universo a matéria não comportava núcleo algum. De fato, nem mesmo os chamados hádrons ordinários (prótons e nêutrons) existiam. Uma “sopa” indiferenciada de partículas elementares colidia incessantemente, com destaque para os “tijolos” elementares dos prótons e nêutrons, denominados quarks e glúons, até que a temperatura do ambiente baixou para uns 170 MeV ($\sim 1,7 \times 10^{12}$ K). De acordo com os cálculos teóricos e as observações da física das colisões de íons pesados, existe uma transição de fase na qual os quarks e glúons formam as “bolhas” que chamamos de prótons e nêutrons para não mais aparecer como estados livres para temperaturas menores que a temperatura da transição de fase. Com efeito, três quarks formam um próton ou nêutron, e todas as outras partículas que participam das interações fortes e formam os núcleos são combinações de quarks. Esta transição de fase leva o nome de *confinamento*.

Agora bem, os prótons e nêutrons cósmicos recém formados não podem construir núcleos de imediato. Nesse momento da história do Universo, alguns \approx microssegundos depois do que conhecemos como “singularidade inicial”, ou seja

um momento extremo da nossa descrição do Universo, a temperatura do ambiente T_U (U para designar Universo) era gigantesca, o que impedia a síntese dos núcleos. Se formado, um núcleo leve era imediatamente quebrado pela radiação (fótons) também presentes no ambiente. Porém, a fração de prótons e nêutrons naquele momento pode ser calculada pela existência de equilíbrio químico garantido pelas interações fracas,

$$n \rightleftharpoons p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (1)$$

$$p \rightleftharpoons n + e^+ + \nu_e, \quad (2)$$

que resultou numa fração de nêutrons por prótons de

$$\frac{n}{p} = \exp\left(-\frac{\Delta mc^2}{k_B T_U}\right), \quad (3)$$

onde k_B é a constante de Planck e $\Delta mc^2 = 1,3$ MeV é a diferença de massas do próton e o nêutron medida no laboratório. Isto não é outra coisa que a lei de ação de massas da química, aplicada à reação nuclear.

Agora bem, para manter o equilíbrio nas reações fracas (1), estas devem ser mais rápidas que a expansão do Universo. Quando esta condição não é mais satisfeita, a razão (3) “congela” e não muda mais enquanto a expansão do Universo continua. Esta temperatura de congelamento resulta ser $T_U = T_F \sim 10^{10}$ K. Usando a equação (3) com Δmc^2 como dado obtemos de imediato

$$n/p \cong 0,17. \quad (4)$$

Pouco depois do congelamento (ou *freezeout* em inglês), a temperatura T_U baixou o suficiente para que a nucleossíntese comece, por volta de 10^9 K. A fração n/p mudou pouco até esse momento, pelo decaimento de alguns nêutrons, e ficou em $\sim 1/7$ quando isto aconteceu [4].

Deste quadro decorre o resultado central da nucleossíntese primordial: se havia 7 prótons por cada nêutron, e como dois prótons não podem fusionar (não existe um estado ligado de dois prótons, o “dipróton” é instável), vemos que 3/4 do total de prótons ficaram sem fusionar, livres. O próton que “sobrou” formou primeiro um núcleo de deutério com um nêutron, e posteriormente He^3 e He^4 , e outros núcleos um pouco mais pesados. Assim, em torno de 25% teria ficado na forma de hélio. Frações muito menores de *Li* foram formadas. Ou seja, podemos dizer com

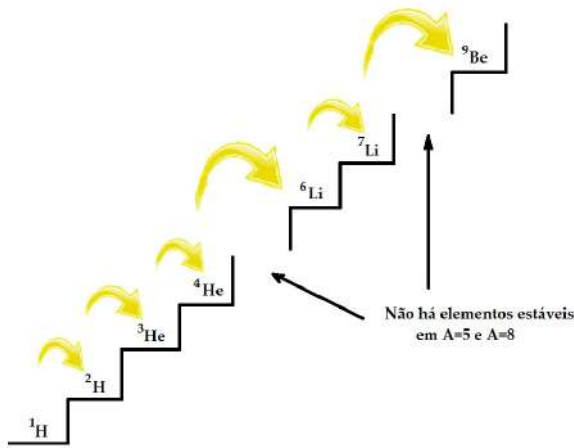


Figura 1: O caminho da nucleossíntese primordial, com os gargalos em $A = 5$ e $A = 8$ que explicam por quê a nucleossíntese se deteve e não avançou para produzir elementos de grande A .

muita generalidade que 75% dos núcleos primordiais são hidrogênio, algo em torno de 25% hélio, e frações muito menores de deutério e de lítio (e talvez algo de berílio). A produção de elementos mais pesados não ocorre, pois a própria expansão do Universo acabou por inviabilizar a formação de elementos mais pesados.

Esta última afirmação diz que a nucleossíntese não conseguiu avançar e produzir carbono ou elementos mais pesados pela simples razão que a expansão de Hubble dificultou o “encontro” dos núcleons e os núcleos leves que permitiriam continuar a fusão. Isto é um fator que se soma a outra dificuldade que é produto de uma característica bem conhecida dos núcleos leves: não existem isótopos estáveis em $A = 5$ e $A = 8$. Assim, para continuar seu caminho até números de massa maiores, a fusão precisaria “pular” esses gargalos apesar da diluição da densidade do ambiente provocada pela expansão do Universo. Este “pulo” implicaria duas fusões sucessivas, com uma única fusão um núcleo em $A = 5$ ou $A = 8$ decair e a nucleossíntese não consegue avançar (Figura 1).

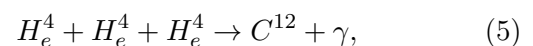
Desta forma concluímos que todos os núcleos com $A > 8$ devem ser produto de fusões e outros processos não cosmológicos. A nucleossíntese do Big Bang produziu somente elementos leves (aquém do berílio que truncou a fusão posterior), e o hidrogênio e hélio são mais de 99% da massa visível do Universo e a matéria fundamental para formar as estrelas onde núcleos mais pesados serão construídos.

3 Nucleossíntese estelar

A formação das estrelas é um segundo estágio do Universo onde a nucleossíntese continua. De fato, as estrelas são frequentemente descritas como enormes reatores nucleares onde a fusão de núcleos leves em outros mais pesados serve para manter a estrutura e impedir o colapso estelar.

A reação fundamental é a da conversão de hidrogênio em hélio, a qual é normalmente descrita de forma muito simplificada, o qual esconde sua natureza complexa e sutil [5]. Basicamente, sabemos que acontecem várias coisas bem diferentes de colocar “4 prótons” juntos e obter hélio (como sugerido em quase todos os textos introdutórios com um desenho bem simples). De fato, já vimos que o dipróton não existe, e assim, uma reação de dois corpos de fusão bem sucedida resulta necessariamente de um decaimento fraco de um próton em nêutron, e no tempo em que está na região do poço de potencial atrativo do outro próton. É bastante claro que isto é um evento raríssimo, e provoca que a produção de energia aconteça com a taxa ditada pelas reações fracas, fazendo com que as estrelas durem da ordem de bilhões de anos. Em suma, quase nenhuma colisão próxima de dois prótons acaba em fusão, somente uma fração muito pequena que corresponde àquelas onde o decaimento espontâneo acontece no tempo certo. Uma exposição mais completa pode ser encontrada na Ref. [5].

Quando não há condições de continuar fusinando hidrogênio em hélio, a estrela sofre transformações estruturais que terminam no adensamento da região central e a ignição do chamado *ciclo triplo- α* , que utiliza o hélio como combustível e produz carbono



que é, na verdade, uma espécie de taquigrafia para algo muito mais complicado [5–7]: se calculada a probabilidade de três hélios se encontrarem simultaneamente na região do poço atrativo, esta seria essencialmente zero. O triplo- α procede primeiro pela fusão de dois hélios dando origem a um estado de instável, mas de longa vida. Uma fração pequena destes consegue encontrar um terceiro hélio e formar carbono, que também não é aquele que conhecemos, mas um estado excitado que decai finalmente em C^{12} . Este caminho dista muito de um desenho onde os 3 hélios estão no mesmo ponto e o carbono emerge, daí que afirma-



Figura 2: Uma das inúmeras nebulosas planetárias (Nebulosa da Borboleta) produzidas pelos pulsos térmicos das estrelas do tipo solar. Imagem do Hubble Space Telescope. O caroço remanescente (composto de $C - O$) deve se converter em uma anã branca com o tempo. Para estrelas mais massivas na Sequência Principal, as anãs brancas resultantes são mais progressivamente compostas de elementos mais pesados (O, Mg, \dots) e têm massas maiores. O recorde atual é de $1,37M_{\odot}$.

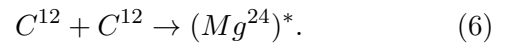
mos que pode-se interpretar a equação (5) como uma taquigrafia simbólica.

Quando feito adequadamente, a energia liberada pelo processo triplo- α , escrita segundo uma expressão paramétrica do tipo $\epsilon(\rho, T) = cte\rho^{\alpha}T^{\beta}$, tem $\alpha = 2$ e $\beta = 41$ (!!!). A dependência com a temperatura do ciclo triplo- α é assim extrema, de tal forma que a exaustão do hélio existente acontece muito mais rapidamente que no caso do hidrogênio do ciclo próton-próton anterior. Um caroço inerte rico em carbono cresce com o tempo, e como consequência das mudanças internas a posição da estrela no diagrama HR muda rapidamente. Existe para a maior parte das estrelas um estágio final de pulsação térmica que expulsa o envelope e resulta nessas imagens belíssimas que vemos nas nebulosas planetárias (por exemplo, na Fig. 2), e deixando para trás o caroço enriquecido em carbono e também algo de oxigênio (a captura α pelo carbono é inevitável, e será tão mais importante quanto maior for a massa do caroço da estrela).

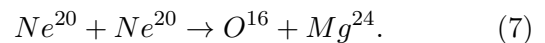
É esse caroço, inicialmente muito quente, que esfriará ao longo de vários *Giga* anos para se tornar finalmente uma anã branca.

Por outro lado, as estrelas de alta massa (aquelas que superam as $8M_{\odot}$), têm condições mais extremas no centro, e atingem o valor da ignição do carbono em $T \sim 8 \times 10^8$ K para continuar sua evolução. As temperaturas são tão elevadas que a emissão de *neutrinos* pelo caroço, partículas

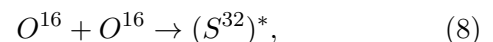
que escoam a energia muito eficientemente mas que não aparecem nas estrelas de massas menores, é agora fundamental para regular a evolução no sentido de se tornar o principal mecanismo de resfriamento. Se a massa for de cerca de $10M_{\odot}$, o carbono funde segundo



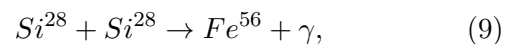
onde o magnésio em estado excitado $(Mg^{24})^*$ decai por muitos canais diferentes, que somados resultam em uma taxa de reações $\propto T^{29}$. Por causa desta dependência extrema, o ciclo de fusão do carbono dura substancialmente *menos* que o triplo- α anterior. Esgotada a fusão do carbono, segue uma geração de energia que não é exatamente uma fusão, mas um rearranjo de “cacos” que é denominado *fotodesintegração do Ne*, onde os núcleos do neônio são quebrados por fótons segundo $Ne^{20} + \gamma \rightleftharpoons C^{16} + \alpha$ e as partículas α capturadas logo em reações do tipo $Ne^{20} + \alpha \rightarrow Mg^{24} + \gamma$. Entre o estado inicial e final, escreve-se de forma efetiva



lembrando que não se trata realmente da fusão de dois neônios (daí as aspas), mas de fragmentos que compõem algo como um neônio “quebrado”. Ainda para $T \sim 2 \times 10^9$, o oxigênio pode fundir, com uma reação inicial



onde também o núcleo de fósforo excitado $(S^{32})^*$ decai logo segundo uma grande quantidade de estados finais, cuja taxa de reações integrada é $\propto T^{35}$. E finalmente, a fusão do oxigênio é seguida por outra reação de fotodesintegração do Si^{28} escrita como



onde os Si^{28} são também um conjunto de fragmentos ou “cacos” com esse número de massa, não um verdadeiro núcleo de silício. Da mesma forma escrevemos que o representa, na verdade, uma série de elementos desse número de massa, que quando produzidos capturam e decaem em partículas rapidamente para formar uma distribuição que se conhece como elementos do “*pico do ferro*”. O que acontece depois no estágio de colapso e explosão é complicado, mas o que aqui importa é que os elementos produzidos em cada

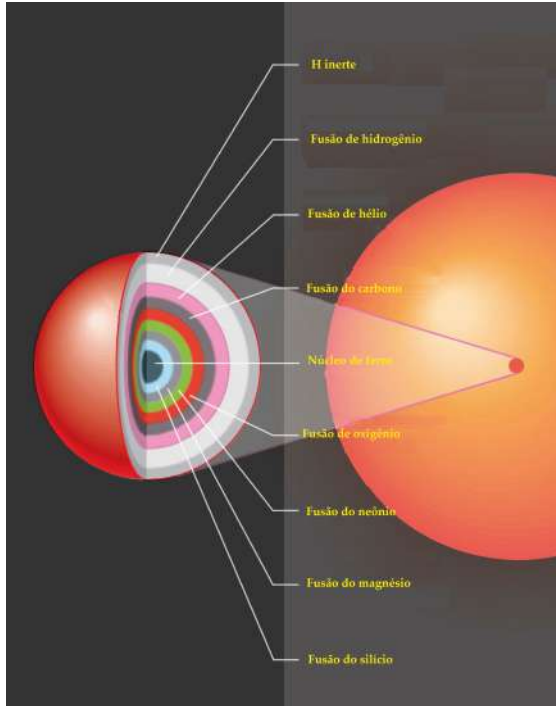


Figura 3: Estrutura de cebola de uma estrela de grande massa. As reações de cada ciclo nuclear continuam nas camadas concêntricas até que o ciclo do silício gera o chamado caroço de ferro, o qual não tem como manter a estrutura assim que chega a seu limite de instabilidade em tempos da ordem de ~ 1 semana (Tabela 1).

ciclo que estão nas camadas sucessivas do envelope (a chamada *estrutura de cebola*, Fig. 3) serão ejetados ao meio interestelar com a explosão da estrela.

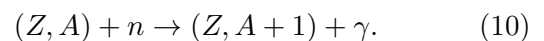
A Tabela 1 mostra para uma estrela de $20M_{\odot}$ os tempos nos quais a estrela é sustentada por cada um dos ciclos. Estes ficam progressivamente mais curtos devido ao vigoroso dispêndio da energia. Para cada estágio de sobrevida da estrela que lança mão do reservatório que ainda possui, com vida cada vez mais curta, e que culmina com eventos de supernova.

Embora nos referimos habitualmente aos produtos principais (por exemplo, o “triplo- α ” produz carbono) existem em cada ciclo processos menos importantes que levam ao aparecimento de elementos importantes, até para a vida (por exemplo, o nitrogênio). Esta contagem está na Tabela 1 na coluna “produtos secundários”, os quais explicam basicamente as abundâncias para $A < 56$ se somarmos as quantidades para cada massa estelar e levarmos em conta a função de massas (em inglês, *Initial Mass Function* ou *IMF*), além do fim das estrelas que ejeta os envelopes e permite que os elementos voltem ao

meio interestelar. Em resumo, a Evolução Estelar permite explicar os elementos mais leves que o “ferro”: eles são formados no interior estelar e expulsos quando as estrelas morrem, nas fases de chamadas de *Asymptotic Giant Branch*, ou *AGB* ou pelas explosões de supernovas tipo Ib, Ic e II. Não podemos perder de vista que as explosões termonucleares (supernovas Tipo Ia) produzem uma nucleossíntese explosiva de importância, por exemplo, a maior parte do ferro na galáxia se deve a estes eventos, bastante frequentes e posteriores à evolução estelar individual.

4 Processos s e processos r

A partir desses elementos gerados pelos ciclos nucleares, o avanço para $A > 56$ é possível pela captura de nêutrons livres no interior das estrelas. Se fosse pela fusão ordinária, não haveria como ir além deste número de massa, já que a energia de ligação aumenta com A a partir desse ponto. Porém, a “construção” de núcleos pesados pela captura de nêutrons é relativamente fácil porque os nêutrons não sentem a grande barreira Coulombiana devida à carga do “ferro”. Estas capturas de nêutrons podem ainda acontecer de duas formas diferentes: lentamente, com tempo de captura típico de $\tau_n \approx 10^4$ anos correspondente às densidades baixas e temperaturas do interior estelar evoluído. A reação de captura de um nêutron pode ser escrita como



se o núcleo “filho” $(Z, A+1)$ é instável, decairá antes de capturar um segundo próton, produzindo $(Z + 1, A + 1)$. E se resulta estável, servirá como base para capturar um outro nêutron, chegando a $(Z, A + 2)$. O mais importante é que o decaimento é muito mais rápido que o tempo entre as capturas τ_n se a densidade for baixa. Os núcleos “filhos” vão ficando cada vez mais pesados, e pela lentidão este processo leva o nome de *s* (de *slow*, lento). Com o processo *s*, o caminho dos núcleos se detém nos pontos de camada fechada em nêutrons. O processo *s* opera por tempos muito longos nos interiores estelares, e um dos sítios onde é muito favorável processar núcleos desta forma é o envelope de estrelas no AGB, onde os chamados *flashes* (expansões súbitas) sucessivos da concha de hélio processam e reprocessam os núcleos, dando origem a uma distribuição de tem-

Tabela 1: Os diferentes ciclos de fusão termonuclear, junto com os principais produtos, temperaturas de ignição e tempos de vida para uma estrela de $20M_{\odot}$. Note-se a aceleração em cada estágio (última coluna).

Combustível	Produto principal	Produtos secundários	Temperatura (10^9 K)	Duração do ciclo (anos)
H	He	^{14}N	0,02	2×10^7
He	C, O	$^{18}O, ^{22}Ne$	0,2	10^6
C	Ne, Mg	Na	0,8	10^3
Ne	O, Mg	Al, P	1,5	3
Si	F	Ti, V, Cr, Ni, Mn, Co	3,5	< Semana

pos de exposição que melhora o acordo com as observações. O processo s produz alguns núclídeos com exclusividade (por exemplo, Sn^{116}) que se pensam ser somente produzidos pelo processo s . Muitos outros núclídeos podem ser produzidos tanto pelo processo s ou, como veremos a seguir, pelo processo r . Assim, as medidas de abundâncias estelares costumam focar uns e outros para separar a importância relativa de cada contribuição. Isto é particularmente verdadeiro nos “picos” de abundâncias de nêutrons observados em $N = 50$, $N = 82$ e $N = 126$ da Fig. 4, este último chamado de “terceiro pico” e que apresenta dificuldades para sua geração e para explicar o urânio, e os transurânicos. Existe, porém, um modo rápido de captura, mas que só pode acontecer nas condições mais extremas. Quando a abundância de nêutrons é muito grande, uns $n_n \approx 10^{23} \text{ cm}^{-3}$, tal como acontece durante as explosões de SN, a captura de nêutrons demora ~ 1 ms, e um isótopo recém-formado ($Z, A + 1$) está em condições de capturar outro nêutron para chegar a ($Z, A + 2$) antes de conseguir decair. Podemos dizer que os núcleos se “engasgam” de nêutrons porque as capturas sucessivas são muito rápidas, daí o nome de processo r (rápido). Tanto o processo s quanto o processo r podem produzir núcleos muito pesados, mas não necessariamente os mesmos. Os máximos calculados para cada um dos processos, correspondentes às camadas fechadas mencionadas (análogas às camadas fechadas dos elétrons na química, mas referidas aos núcleons dentro dos núcleos) estão na Fig. 4.

Para esclarecer um pouco mais como acontecem o processo s e o processo r . Mostramos na Fig. 5 um detalhe dos caminhos na Tabela de isótopos para os dois casos, e os caminhos seguidos pelos processos nela.

Restam agora duas questões de importância: a primeira é onde existem as condições para for-

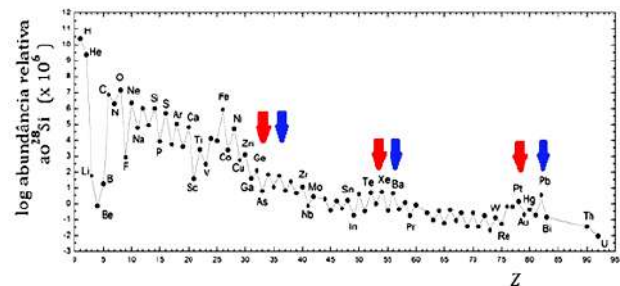


Figura 4: Máximos das abundâncias produzidas pelo processo s (vermelho) e r (azul). Como apontamos, estes máximos não coincidem. Elementos próximos devem sua existência a processos diferentes, que acontecem em locais diferentes. Por exemplo, o Sn^{116} , é de produção exclusiva do processo s , mas o irídio 77 têm isótopos somente produzidos pelo processo r . Outros elementos podem ser produzidos pelos dois processos.

mar núcleos pelo processo s e pelo processo r . A segunda é, até que ponto (se produzidos) esses núcleos voltam ao meio interestelar. O trabalho monumental que iniciou todas estas pesquisas é o de Burbidge e colaboradores [6], ainda muito atual e pioneiro em toda a nucleossíntese estelar.

5 Nucleossíntese explosiva/catastrófica

Finalmente, consideraremos a nucleossíntese na sua forma mais extrema e violenta, isto é, durante eventos explosivos/eruptivos ao final da evolução das estrelas, e até muito depois, como no caso da “ressurreição” da matéria de nêutrons que estava soterrada nas estrelas de nêutrons quando acontece uma fusão e matéria é ejetada em alta velocidade e forma núclídeos importantes (vide a seguir) .

O primeiro tipo de evento é encarnado pelas explosões de supernova, mais precisamente, pelos eventos denominados Tipo II, Tipo Ib e Tipo Ic. Apesar da denominação, todos eles são considerados eventos nos quais uma estrela de grande

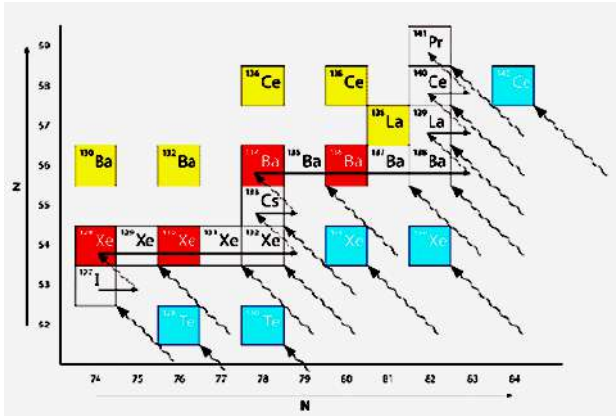


Figura 5: As capturas de nêutrons em ambientes de baixa densidade n_n (linhas horizontais cheias de esquerda a direita) são seguidas de decaimentos (linhas diagonais ascendentes) e fazem crescer o A em escalas de tempo muito longas (processo s , caminho tipo zig-zag). As capturas sucessivas sem decaimentos aumentam o N levando os núcleos bem para a direita no processo r , fora do vale de estabilidade até lugares como os indicados para os núcleos de Ce , Xe e Te deste exemplo, enquanto alguns decaem depois (flechas ascendentes da direita para a esquerda).

massa ($M \geq 10M_{\odot}$) implode para depois explodir, deixando em geral uma estrela de nêutrons que sucede ao núcleo estelar colapsado. Mas a passagem de um choque (que energiza a explosão) desde as regiões mais internas, o qual carrega uma enorme densidade de nêutrons livres, cria condições para o já mencionado processo r (rápido). Em poucas palavras, as capturas sucessivas de nêutrons aumentam o número de massa A sem que estes núcleos-alvo consigam decair (eles “engasgam” de nêutrons, capturados a cada $< 10^{-3}$ s). O caminho desta nucleossíntese é o mostrado na Fig. 5 com flechas horizontais longas da esquerda para a direita [7].

Há algumas décadas esperava-se que o processo r nas explosões de supernovas fosse o único responsável pela montagem de núcleos muito pesados a partir de outros mais leves e abundantes. Povoar o chamado “terceiro pico”, da Tabela Periódica (actínídeos), porém, mostrou-se bastante difícil quando o processo inteiro foi considerado em detalhe. Um dos cálculos recentes, que leva em conta as incertezas decorrentes das taxas de captura, massas nucleares e uma série de outras quantidades não muito bem conhecidas, é mostrado na Fig. 6.

Em suma, a explosão de uma supernova não só ejeta camadas inteiras de matéria já processada pela nucleossíntese que manteve a estrela em equilíbrio por muitos milhões de anos (incluída a

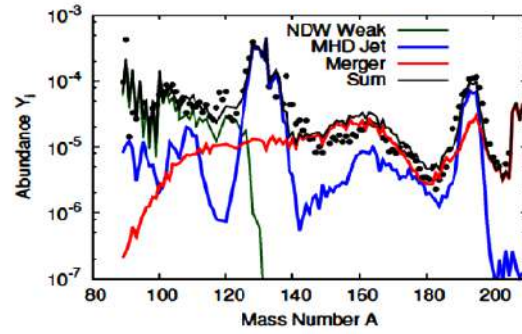


Figura 6: As contribuições relativas para os picos de abundâncias segundo Kajino et al. [8]. Note-se que estes autores obtêm que os jatos magneto-hidrodinâmicos (curva azul) de algumas supernovas são os dominantes no terceiro pico, mas que as fusões de estrelas de nêutrons dominam para $A > 200$.

que sofreu processo s), mas também produz de forma “instantânea” núcleos que também contribuem para as abundâncias no meio interestelar. Em alguns casos esta última é significativa, já que alguns núcleos somente são produzidos pelo processo r , mas as dificuldades para obter, por exemplo, as abundâncias observadas dos actínídeos (chumbo, ouro e platino entre outros) fez com que a comunidade ficasse testando outros sítios astrofísicos. Veremos a seguir a inesperada contribuição que foi confirmada na primeira detecção de uma fusão de duas estrelas de nêutrons “mortas”.

6 A fusão de duas estrelas de nêutrons e a Tabela Periódica

A sugestão de que haveria um caminho alternativo para produzir elementos pesados aparece pela primeira vez num trabalho de Eichler, Livio, Piran e Schramm em 1989 [9]. Estes autores observam que, se descomprimida a matéria de nêutrons, as “gotinhas” resultantes da fragmentação (núcleos) poderiam preencher a região de alto A da Tabela Periódica. O evento onde isto pode acontecer é na fusão de duas estrelas de nêutrons.

Quarenta anos depois deste trabalho, a disponibilidade de detectores de ondas gravitacionais (LIGO e Virgo) permitiu pela primeira vez observar um evento cosmológico, transmitir rapidamente uma localização aproximada e coletar assim umas 70 detecções de vários instrumentos, desde raios gama ao infravermelho (Fig. 7).

A identificação do evento GW170817 como

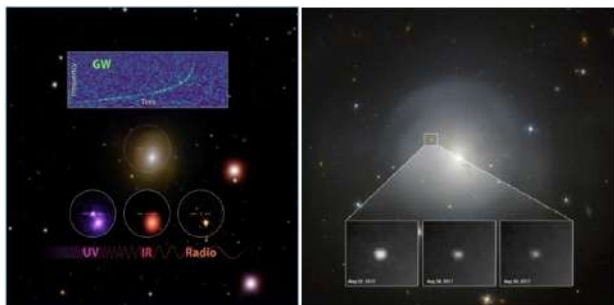


Figura 7: Esquerda: o sinal detectado do evento GW170817 (acima) e a localização do mesmo em raios gama (centro), acompanhada de detecções em UV, infravermelho e rádio (abaixo) em mais de 60 instrumentos. Direita: imagens ópticas do Telescópio Espacial Hubble em 22, 26 e 28 de Agosto de 2017, mostrando o declínio da magnitude óptica do transitório associado ao evento.

duas estrelas de nêutrons que se fusionaram foi possível pela comparação da forma da onda gravitacional registrada com simulações de arquivo detalhadas. Embora não foi possível saber com certeza as massas individuais das estrelas que participaram, a soma das massas das duas foi bem determinada, $M_1 + M_2 = 2.74 \pm_{0.01}^{0.04} M_\odot$. É provável que tenha sido produto de duas massas idênticas, embora a faixa aceitável determinada admite assimetria: $M_1 = [1.36M_\odot, 1.6M_\odot]$ e $M_2 = [1.17M_\odot, 1.36M_\odot]$. Utilizando uma combinação de dados observados e simulações numéricas, foi possível abordar a questão da contribuição deste tipo de eventos para a Tabela Periódica.

Um fato importante neste sentido foi a observação da existência de um brilho adicional depois de \sim dias do evento, denominado *kilonova* [10]. A kilonova é interpretada como o produto da presença de elementos de massa $A \approx 140$ (lantânídeos) na matéria ejetada, que provocam a retenção da energia pela sua alta opacidade aos fótons. De fato, nos espectros do evento foram observadas linhas claramente associadas aos lantânídeos. Assim, direta e indiretamente (através da presença da kilonova), a fusão estelar mostra a produção de elementos do “segundo pico” da Tabela Periódica, desta vez pela descompressão da matéria de nêutrons superdensa ejetada e fragmentada, tal como sugerido por Schramm e colaboradores.

Por outro lado, a evolução temporal do brilho (chamada de *curva de luz* na astronomia) foi interpretada como decorrente da produção de actínídeos ($A \sim 200$) que injetam depois energia pelos decaimentos radioativos. Esta energia não sai imediatamente da região precisamente pela

retenção dos lantânídeos também produzidos no evento.

É possível calcular quanta matéria, por exemplo, em chumbo, ouro, platino etc. foi formada pela fusão estelar para explicar a curva de luz. O resultado indica que é possível que unicamente estes eventos sejam o lugar do Universo onde os actínídeos mais importantes são produzidos. Esta é uma hipótese radical, mas não descabida, e está ancorada diretamente nas observações.

Os esforços teóricos, enquanto novos eventos são procurados, se dirigem a calcular o desfecho da matéria ejetada, sua fragmentação e reprocessamento para estabelecer a nucleossíntese final. Existem muitas perguntas pendentes, entre as quais se conta a importância relativa das fusões e nucleossíntese das supernovas Tipo II, Ib e Ic (Fig. 6). Mas hoje poderíamos dizer para o próprio Mendeleev que estamos a caminho de uma compreensão abrangente da Tabela que ele criou e que norteia os cientistas há mais de um século.

Sobre o autor

Jorge Ernesto Horvath (foton@iag.usp.br), Professor Titular no Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Espaciais (IAG), da Universidade de São Paulo (USP), é Graduado em Física e Doutor em Ciências Exatas pela Universidad Nacional de La Plata (Argentina), e possui Livre Docência pela USP. Autor de pesquisas em Astrofísica Relativística, Altas Energias e Cosmologia, além de vários livros no Brasil e no exterior para os diferentes níveis de educação. Pesquisador Nível I do CNPq e visitante na University of Arizona (1998-1999). Fundador e Coeditor da Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia (RELEA) desde 2003. Coordenou de 2011 até 2021 o Núcleo de Pesquisas em Astrobiologia da USP.

Referências

- [1] K. Horvath, P. Bretones e J. Horvath, *Interdisciplinary study of the synthesis of the origin of the chemical elements and their role in the formation and structure of the Earth*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42**, e20200160 (2020).

- [2] G. Lemaître, *The Primeval Atom: An Essay on Cosmogony* (Van Nostrand, Nova York, 1950).
- [3] R. A. Alpher, H. Bethe e G. Gamow, *The origin of chemical elements*, [Phys. Rev. **73**, 803 \(1948\)](#).
- [4] J. E. Horvath et al., *Cosmologia Física* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- [5] J. E. Horvath, *As estrelas na sala de aula* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2019).
- [6] E. M. Burbidge et al., *Synthesis of the elements in stars*, [Rev. Mod. Phys. **29**, 547 \(1957\)](#).
- [7] J. E. Horvath, *Fundamentos da Evolução Estelar, supernovas e objetos compactos* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011).
- [8] T. Kajino e G. J. Mathews, *Impact of new data for neutron-rich heavy nuclei on theoretical models for r-process nucleosynthesis*, [Reports on Progress in Physics **80**\(8\), 084901 \(2017\)](#).
- [9] D. Eichler et al., *Nucleosynthesis, neutrino bursts and γ -rays from coalescing neutron stars*, [Nature **340**\(6229\), 126 \(1989\)](#).
- [10] B. D. Metzger, *Kilonovae*, [Living Reviews in Relativity **23**\(1\), 1 \(2019\)](#).

Missão Espacial Gaia

Ramachrisna Teixeira

Universidade de São Paulo

Resumo

Com observações cuidadosas e sistemáticas do céu, há muito tempo o ser humano vem construindo e refinando o seu conhecimento a respeito do Universo e de si mesmo. As grandezas observacionais sobre as quais repousa a astronomia estão sendo, finalmente, abundantemente medidas e com precisões inimagináveis graças à Missão Espacial Gaia da Agência Espacial Europeia. Com seus três *data releases* (2016, 2018 e 2020/22), temos, hoje, em nossas mãos, dados observacionais em quantidade e com qualidade com as quais até bem pouco tempo nem sonhávamos. Entre eles, a grandeza mais importante de toda a astronomia: a distância de mais de um 1,5 bilhão de estrelas que nos permite dizer onde se encontram, como são e como “dançam”, iniciando assim, uma nova era no estudo da Galáxia e do Universo. Esses dados, disponibilizados para o mundo todo ao mesmo tempo, representam uma alteração radical na base do conhecimento astronômico e impactam tremendamente a astronomia no sentido mais amplo do termo, por muitos e muitos anos. Colegas de todas as partes do mundo estão mergulhados nesse oceano de posições, movimentos, brilhos, cores, etc, confirmando, revendo e refinando o que sabemos e prestes a enfrentarem, uma vez mais na história, *o novo*.

Abstract

With careful and systematic observations of the sky, human beings have been building and refining their knowledge about the Universe and about themselves for a long time. The observational magnitudes on which astronomy rests are finally being measured abundantly and with unimaginable precision thanks to the Gaia Space Mission of the European Space Agency. With its three *data releases* (2016, 2018 and 2020/22), we have, today, in our hands, observational data in quantity and quality that until very recently we did not even dream of. Among them, the most important greatness of all astronomy: the distance of more than 1.5 billion stars that allows us to say where they are, what they look like and how they “dance”, thus starting a new era in the study of the Galaxy and the Universe. Universe. This data, made available to the entire world at the same time, represents a radical shift in the astronomical knowledge base and will tremendously impact astronomy in the broadest sense of the term, for many, many years to come. Colleagues from all over the world are immersed in this ocean of positions, movements, brightness, colors, etc., confirming, reviewing and refining what we know and about to face, once again in history, *the new*.

Palavras-chave: Missão Espacial Gaia, telescópios espaciais, Via Láctea, galáxias, astrometria.

Keywords: Gaia Space Mission, space telescopes, Milk Way, galaxies, astrometry.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38511](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38511)

1 Introdução

Como sabemos, de longa data, a astronomia é uma ciência observacional. Isso significa que ela depende essencialmente das observações dos astros. Essa dependência é tão forte que poderíamos, sem exagero, dizer que a astronomia é a ciência que estuda a luz dos astros. São as observações que nos instigam, que nos ensinam e que fortalecem ou enfraquecem o conhecimento estabelecido.

Ao observarmos um astro qualquer, coletamos sua luz e medimos duas grandezas, apenas duas, não mais do que isso. A intensidade e a direção

de onde vem a luz. Em outras palavras, o brilho aparente, que pode ser medido com diferentes filtros e a posição do astro na esfera celeste, ou seja, a direção onde o vemos em relação a uma direção “fixa” tomada como referência.

Naturalmente, as próprias observações nos levaram, em um passado bem distante, a perceber que tanto uma quanto a outra grandeza podiam variar ao longo do tempo, e bem mais tarde, que a intensidade em particular, podia ser decomposta fornecendo um espectro de frequências.

No passado, as observações dessas diferentes grandezas praticamente impuseram uma divisão

da astronomia em três grandes áreas observacionais: astrometria, fotometria e espectroscopia. Assim, mesmo que, em geral, obtidas separadamente e por estratégias diferentes, em conjunto formaram a base do conhecimento. Já hoje, sobretudo com as observações digitais, é possível medir essas quantidades em uma mesma observação e com um único equipamento.

De uma forma ou de outra, o que podemos realizar com essas medidas depende substancialmente das precisões das observações e da abundância de dados. É justamente nesse aspecto que a Missão Espacial Gaia [1–3] da Agência Espacial Europeia é revolucionária. Tanto as grandezas observacionais quanto aquelas delas derivadas são abundantes e precisamente medidas e determinadas. Temos hoje em nossas mãos milhões de vezes mais dados do que tínhamos há alguns anos e com precisões extremas [4].

Com dados astrométricos, fotométricos e espectroscópicos para aproximadamente dois bilhões de estrelas o objetivo primeiro dessa empreitada é contar a história da Via Láctea de maneira muito mais realística e com um nível de detalhamento sem precedentes.

Dentre todas as grandezas com as quais trabalhamos, sem dúvida a distância é a mais importante. É ela que nos permite transformar o que observamos que é, portanto, aparente em absoluto. A determinação das distâncias dos astros não é simples e baseia-se em várias estratégias, cujos alcances são limitados.

A calibração da escala de distância do Universo repousa na medida de paralaxes estelares, ou seja, na medida da variação da posição aparente de uma estrela vista da Terra devido ao movimento orbital do nosso planeta. Não é à toa que essa grandeza astrométrica, medida de forma absoluta graças ao arranjo dos telescópios Gaia e com precisões da ordem de microssegundos de grau, é o foco principal dessa missão espacial. Também neste caso, o satélite Gaia é único.

2 Missão Espacial Gaia

A astronomia como um todo muito se beneficiou e se beneficia das observações a partir do espaço que nos livra da grande barreira imposta pela atmosfera terrestre quando das observações a partir do solo. Do espaço podemos observar e descobrir o céu em diferentes frequências normal-

mente filtradas pela atmosfera e com muito mais qualidade. Podemos penetrar regiões encobertas por nuvens de gás e poeira, observar novos fenômenos e produzir um conhecimento complementar àquele construído ao longo de muitos séculos de observações realizadas a partir do solo no visível.

Assim, livre de uma série de distorções e perturbações atmosféricas observamos com maior resolução, maior precisão e, portanto, realizamos medidas mais confiáveis. A astrometria, extremamente sensível à precisão, ganhou muito com as observações espaciais, em particular, com a possibilidade de determinar paralaxes absolutas, construir e materializar um sistema de referência homogêneo, rígido, acessível, mais próximo de um inercial do que jamais e com um único instrumento.

Nesse contexto, surgiu a Missão Espacial Gaia que se constituiu em um dos projetos mais ambicioso, ousado e espetacular da astronomia dos últimos tempos. As observações realizadas com o satélite Gaia alteraram radicalmente e vão alterar ainda mais, a base de dados sobre a qual repousa a astronomia e está nos conduzindo a avanços sem precedentes no conhecimento da Via Láctea e do Universo como um todo.

O foco principal da missão Gaia são as estrelas da nossa galáxia e de galáxias vizinhas para as quais são medidos precisamente posições, brilhos e espectros. De posse dessas grandezas determina-se as distâncias, cores e movimentos a partir dos quais pode-se obter luminosidades, temperaturas, dimensões, tipos espectrais, massas e idades.

Embora a missão tenha sido concebida pensando nas estrelas são observados também milhões de quasares e objetos extensos como corpos do Sistema Solar e galáxias compactas. Esses objetos recebem tratamentos específicos no seio do Gaia-DPAC (Data Processing and Analysis Consortium) a partir dos quais são extraídas informações científicas que permitem explorá-los. Além disso, o satélite Gaia tem detectado milhares de exoplanetas.

A Missão Espacial Gaia começou, de certa forma, a ser pensada e construída após o lançamento do primeiro satélite astrométrico HIPPARCOS (High Precision Parallax Collecting Satellite - ESA 1997) em agosto de 1989. Naturalmente, foram muitas idas e vindas e finalmente

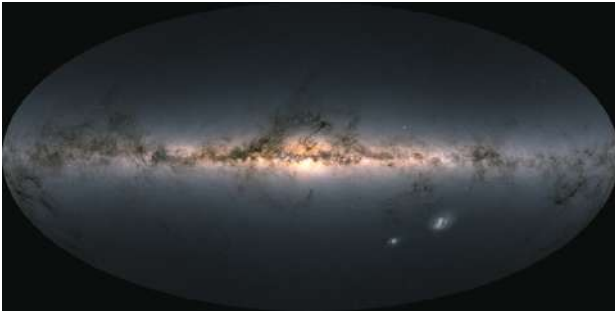


Figura 1: Mapa da Via Láctea construído com dados do Gaia DR3. Cada pixel da imagem representa a “soma” dos fluxos de milhares de estrelas observadas pelo satélite. Diferentemente de uma foto, esses pontos não são anônimos: sabemos onde estão, como são, de onde vieram e para onde irão. Crédito: ESA/Gaia/DPAC

foi totalmente encampada pela ESA em 2006. O lançamento do satélite ocorreu em dezembro de 2013 e as observações científicas se iniciaram em julho de 2014.

Originalmente as observações estavam previstas para 60 meses. Com o sucesso inicial foi prolongada por mais 24 meses e, provavelmente, ganhará ainda mais 36 meses, perfazendo um total de 10 anos de observações. Com esse volume de observações as precisões irão melhorar ainda mais sobretudo em movimento próprio.

Os dados do Gaia são publicados em *data releases* a cada 2 anos aproximadamente e são disponibilizados para o mundo todo ao mesmo tempo. O primeiro, Gaia DR1, foi em setembro de 2016 [2] com resultados baseados em 14 meses de observação. O segundo em abril de 2018, Gaia DR2, relativo a 22 meses de observação [4, 5] e o terceiro, relativo a 34 meses de observação, foi dividido em duas partes: a primeira, Gaia EDR3, em dezembro de 2020 [6] e a segunda parte, Gaia DR3 [7–11] em 13 de junho de 2022. Deveremos ter um quarto *release* em 2025 contendo os resultados dos 60 meses de observação previstos originalmente e de mais 6 meses da extensão da missão. O restante será provavelmente publicado em um único *release* sem data definida, mas pensada para 2030.

Na Figura 1 a seguir, temos uma imagem icônica da Missão Espacial Gaia, neste caso construída a partir dos dados do terceiro *data release*. Não se trata de uma foto ou concepção artística. Trata-se do mapa mais rico e preciso da Via Láctea construído até hoje.

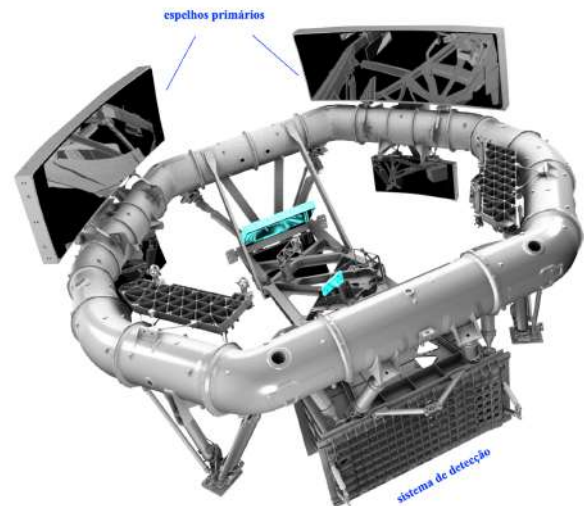


Figura 2: Telescópios Gaia: arranjo de espelhos e sistema de detecção. Crédito: ESA/Gaia/DPAC - EADS Astrium.

3 Observações Gaia

As observações com o satélite Gaia apresentam várias particularidades que o tornam único. Por um lado, são realizadas através de dois telescópios com um plano focal comum. Os espelhos primários desses telescópios são retangulares, $0,50\text{ m} \times 1,45\text{ m}$ ($0,6^\circ \times 1,7^\circ$ no céu) e são estrategicamente montados de tal forma que simultaneamente apontam para direções separadas por um ângulo, extremamente estável e bem conhecido, de $106,5^\circ$: ângulo básico.

A luz assim coletada é conduzida por 35 metros, até alcançar o plano focal comum, por uma sequência de 10 espelhos menores e diferentes entre si.

Essa estratégia de observação, já adotada no primeiro satélite astrométrico HIPPARCOS [12], permite a realização de uma astrometria de grandes ângulos e, conseqüentemente, a determinação de paralaxes absolutas, ou seja, sem necessidade da hipótese de paralaxes nulas para as estrelas de fundo.

Desse ponto de vista, idealmente, o ângulo básico seria 90° o que zeraria o fator paralático, mas por razões de engenharia ficou em $106,5^\circ$ que nos dá ainda uma minimização do mesmo mais do que suficiente para considerar a paralaxe como sendo absoluta.

Uma outra particularidade das observações com o satélite Gaia é que, diferentemente da grande maioria, não se trata de um telescópio a ser apontado para alvos pré-definidos por pesqui-

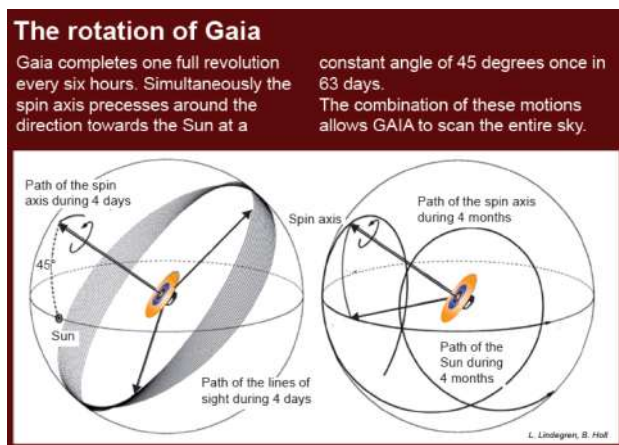


Figura 3: Esboço da varredura do satélite. Crédito: L. Lindegren and B. Holl.

sadores com interesses científicos específicos.

O satélite Gaia encontra-se “varrendo” o céu todo e medindo as posições, brilhos, cores, fotoespectro para todos os objetos até $V \sim 21$ magnitudes. Esse limite de detecção pode ser e tem sido ligeiramente alterado ao longo da missão. Além disso, observa o espectro daqueles objetos mais brilhantes que $V \sim 17$ magnitudes visando a determinação de suas velocidades radiais e características astrofísicas.

O satélite possui um movimento de rotação com período de 6 horas cujo momento angular é perpendicular ao plano contendo as duas linhas de visada e a 45° da direção do Sol, como se pode ver na Figura 3. Dessa forma, um astro transita pelo campo do telescópio por, aproximadamente, 10 segundos [1]. O seu eixo de rotação por sua vez, precessiona ao redor do Sol com um período de 63 dias, alterando lentamente a direção da rotação do satélite. À medida que o Sol se desloca na eclíptica o eixo de rotação do satélite executa lentamente *loopings* em torno da direção do Sol de tal forma a completar uma varredura do céu em aproximadamente 3 meses [3].

No plano focal dos telescópios temos um mosaico de 106 *charge-coupled devices* (CCD), 4 deles voltados para controles técnicos, e os demais organizados, como mostrado na Figura 4, de tal forma a perfazer as observações, astrométricas, fotométricas, foto-espectrométricas e espectroscópicas. Desses, 14 CCDs compõem o *sky mapper* (SM), 62 o *astrometric field* (AF), 7 o fotoespectrômetro azul BP e 7 o fotoespectrômetro vermelho RP. Os 12 restantes compõem o mosaico espectroscópico para a medida da veloci-

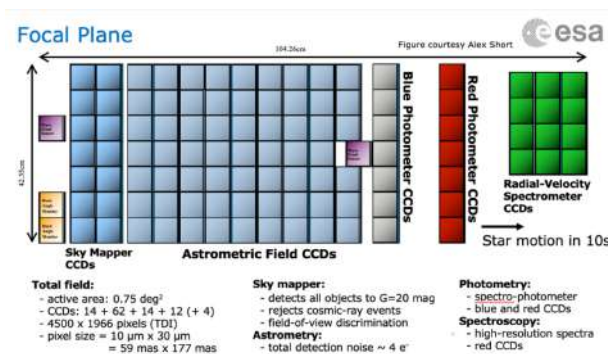


Figura 4: Sistema de detecção no plano focal comum aos dois telescópios onde se vê a repartição dos “chips-CCDs” em suas diversas funções. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

dade radial: *radial-velocity spectrometer* (RVS). São aproximadamente 1 bilhão de pixels retangulares com tamanhos de $10 \mu\text{m}$ na direção do trânsito *along-scan* (AL) e $30 \mu\text{m}$ na direção perpendicular *across-scan* (AC) correspondendo em milissegundos de arco a $58,9 \text{ mas} \times 176,8 \text{ mas}$ ($\text{mas} = \text{milliarcsecond}$).

Antes da observação propriamente dita, o objeto é avaliado por um sistema de detecção no *sky mapper* que irá “decidir” se deve ou não ser observado, ou seja, se os dados desse objeto serão ou não enviados para a Terra. O satélite não envia imagens para a Terra, apenas códigos numéricos contendo a informação em pequenas janelas ao redor do objeto suficiente para a extração dos dados observacionais para fazer ciência. Essa tarefa de extração da informação científica cabe, como dito, a mais ou menos 400 pesquisadores, engenheiros e técnicos que compõem o Gaia-DPAC, dividido em várias unidades de coordenação que podem apresentar subdivisões, cada uma voltada para uma temática específica: estrelas variáveis, velocidades radiais, corpos do Sistema Solar, quasares, galáxias, etc.

No *astrometric field*, Figura 4, ocorrem as observações astrométricas, instantes de trânsito de cada objeto, e fotométricas na banda G: “luz branca” não filtrada no intervalo de 330 a 1.050 nm. Após transitar pelo *astrometric field* os objetos passam por dois conjuntos, prismas dispersores + CCDs, que compõem os fotoespectrômetros: BP na banda de 330-680 nm e RP na banda de 640-1.050 nm fornecendo assim uma fotometria multicor para todas as estrelas e um espectro de baixa resolução. Finalmente, os objetos mais brilhantes que $V \sim 17$ magnitudes serão espectroscopicamente observa-

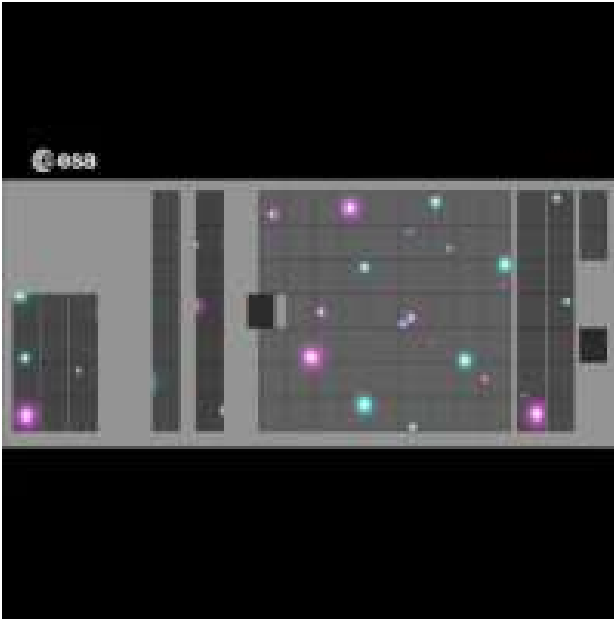


Figura 5: - Ilustração da observação no modo TDI onde vemos o trânsito de vários objetos pelo plano focal comum dos telescópios Gaia. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

dos no intervalo de 847-874 nm (triplete do cálcio) com o espectrômetro RVS de média resolução ($\lambda/\Delta\lambda = 11.700$) destinado às medidas de velocidades radiais e de características físicas dessas estrelas.

Para “varrer” o céu os detectores CCDs funcionam de uma maneira pouco usual que podemos dizer de “varredura síncrona”, em inglês *drift-scanning* ou “*time delayed integration* (TDI). Esse tipo de observação foi bastante utilizado em solo nos anos 90 em instrumentos como, por exemplo, os círculos meridianos do Observatório Abrahão de Moraes (IAG/USP-Valinhos) e do Observatório de Bordeaux - França [13]. Trata-se de instrumentos de trânsito, concebidos para a determinação precisa de posições relativas e/ou absolutas. Ao serem automatizados com a instalação de câmeras CCDs, as mesmas, obrigatoriamente, tinham que operar no modo TDI, uma vez que esses telescópios se movimentam apenas ao longo do meridiano. Com isso, eles perderam sua capacidade de determinar posições de forma absoluta, mas ganharam a medida fotométrica associada àquela da posição mais precisa de um fator 2-3. Além disso, rotineiramente, passou-se a observar, em vez de apenas algumas dezenas, dezenas de milhares de objetos por noite.

Tanto no caso dos círculos meridianos quanto do satélite Gaia, a observação de um objeto implica que as cargas geradas nos pixels devido a

incidência de luz sejam deslocadas de um “pixel” ao seguinte com a mesma velocidade com que o astro desfila no campo devido ao movimento de rotação da Terra ou da rotação do satélite. Não é o instrumento que acompanha o astro, mas sim as cargas na câmera CCD de maneira que de um “pixel” a outro elas vão se adicionando.

As observações astrométricas do Gaia, como também era no caso dos círculos meridianos, consistem no registro do instante da passagem do astro por uma referência fixa no plano focal e da posição na direção perpendicular à rotação (ao trânsito). A partir do instante registrado obtém-se as pequenas separações angulares entre as várias estrelas do mesmo campo e em uma escala maior entre aquelas de um campo com o outro [14].

A grande precisão alcançada pelo Gaia se deve a vários fatores como por exemplo às dimensões dos telescópios, à repetição de observações de um mesmo objeto (em média 140/objeto ao final dos 10 anos de missão), à sensibilidade dos detectores e à estabilidade do instrumento.

4 Gaia data releases

As divulgações dos dados observacionais do satélite Gaia têm sido realizadas a, aproximadamente, cada 2 anos para aqueles objetos com uma boa solução astrométrica. A filosofia da divulgação é disponibilizar esses dados para o mundo todo ao mesmo tempo. Não existem grupos privilegiados que possam acessá-los antecipadamente para fazer ciência, a menos de raríssimas exceções como em observações de ocultações de estrelas por corpos do Sistema Solar. Esses dados são manipulados antes da divulgação somente pelos membros do DPAC no sentido da extração da informação científica a partir dos dados brutos transmitidos ao solo e da validação desse trabalho. Justamente, cada *release* é acompanhado de vários artigos do DPAC apresentando os resultados, metodologia de geração dos mesmos, análise de validação e algumas “sugestões” de exploração científica

Em setembro de 2016 foi publicada a primeira leva de dados Gaia DR1 [1,2] baseado em apenas 14 meses de observações. Os dados publicados nesse primeiro *release* são superficialmente resumidos a seguir.

- Posições e magnitudes na banda G para pouco mais de 1 bilhão de fontes até um li-

mite $G \sim 20.7$ magnitudes, respectivamente com precisões de 10mas e de 0,001 a 0,030 mag.

- Astrometria completa (posições, paralaxes e movimentos próprios) para 2 milhões de estrelas brilhantes comuns com os catálogos HIPPARCOS [12] e Tycho-2 [15], igualmente baseados em observações espaciais. Dessa combinação resultou o catálogo Tycho-Gaia Astrometric Solution - TGAS [16], com precisões típicas em posições e paralaxes de 0,3 mas e de 1 mas/ano em movimento próprio. Para 94 mil estrelas HIPPARCOS as precisões nos movimentos próprios alcançaram 0,06 mas/ano. Essa combinação não estava prevista, mas foi oportuna pois colocou nas mãos da comunidade, dados essenciais com qualidade superior ao que existia.
- Curvas de luz para 3 mil cefeidas e RR Lyrae.

O segundo *release*, baseado em 22 meses de observação, ocorreu em abril de 2018 e, “instantaneamente”, devido à abundância e qualidade alterou radicalmente a base de dados sobre a qual repousa a astronomia e, portanto, marcou uma nova era dessa ciência. Entre tantos outros, como mostrado a seguir, foram mais de 1 bilhão de paralaxes estelares, permitindo finalmente dizer onde estão, como são e como dançam as estrelas da nossa e das galáxias vizinhas.

No Gaia DR2 já tínhamos uma imagem como a da Figura 1, com um pouco menos objetos. Como dito, essa imagem simboliza a grandeza e o alcance dessas observações.

O conteúdo do segundo data release Gaia-DR2 é resumido a seguir:

- Posições e brilhos aparentes de aproximadamente 1,7 bilhão de estrelas com precisões, respectivamente, de 1 milissegundo a 40 microsegundos de grau e 20 a 1 milimag;
- Brilhos aparentes no azul e no vermelho, paralaxes e movimentos próprios de 1,3 bilhão dessas estrelas;
- Classificação de 500 mil estrelas variáveis com caracterização das curvas de luz;
- Velocidades radiais de mais de 7 milhões de estrelas com precisões de 200 a 2.000 m/s;
- Temperaturas efetivas de aproximadamente 160 milhões de estrelas;

- Cor, raio e luminosidade de aproximadamente 80 milhões de estrelas;
- Posições, brilhos e órbitas de pouco mais de 14 mil asteroides conhecidos;
- Posições e magnitudes de mais de 500 mil quasares.

Como se pode ver, este *release* é muito mais rico que o anterior. O número de observação de cada objeto é maior permitindo assim melhorar a precisão das medidas, refinar a identificação dos objetos rápidos e resolver objetos muito cerrados. Além disso, os releases são enriquecidos com novos objetos e novas categorias de objetos.

Assim, com o terceiro *release* publicado em duas etapas, EDR3 em dezembro de 2020 e DR3 em 13 de junho de 2022, tivemos mais um salto gigantesco e radical na base de dados sobre a qual repousa o conhecimento astronômico. É como se tivéssemos passado a viver uma realidade com a qual ainda nem tínhamos sonhado.

Nesse *release* aparecem, pela primeira vez, parâmetros morfológicos de galáxias e de galáxias hospedeiras de quasares, solução de sistemas estelares múltiplos não resolvidos, espectros e classificação espectral, *redshifts* e muitos outros dados observacionais e derivados. O Gaia DR3 baseia-se em 34 meses de observações, realizadas de 25/07/2014 a 28/05/2017.

O conteúdo estelar presente no terceiro *release* de dados compreende posições e magnitudes G para 1,8 bilhão de estrelas com limite superior em torno de 21 magnitudes e inferior em torno de 3 magnitudes. Para 1,5 bilhão desses objetos temos a astrometria completa (posição, paralaxe e movimento próprio) e a cor. Entre esses, 813 mil sistemas binários, cerca de 40 vezes mais do que era conhecido até então, com posições, distâncias, órbitas e massas.

Parâmetros astrofísicos (luminosidade, raio, temperatura, composição química e metalicidade) a partir dos espectros de baixa resolução BP/RP são fornecidos para 470 milhões de estrelas e a partir dos espectros de média resolução (RVS) para 5,6 milhões. Temos o tipo espectral para 217 milhões de estrelas e para 57 mil delas com linhas de emissão. Além disso, parâmetros espectroscópicos para 2,3 milhões de estrelas quentes e 94 mil ultrafrias.

A componente radial do movimento estelar foi medida para 33 milhões de estrelas mais brilha-

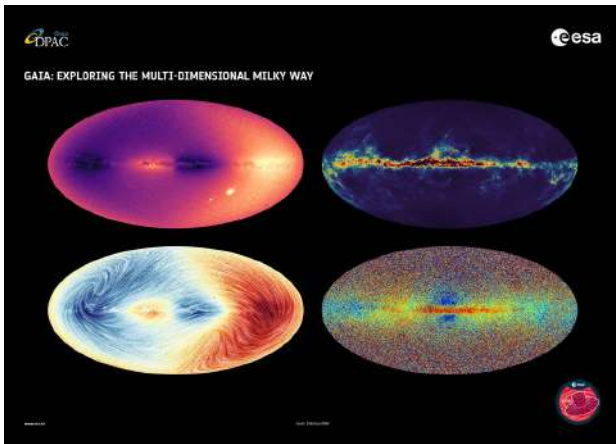


Figura 6: Figura icônica da Via Láctea do Gaia DR3: as várias dimensões da Via Láctea. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

tes que G 14 magnitudes e temperaturas efetivas entre 2.1000 a 14.500 K. Para 3,5 milhões delas com $G < 12$ magnitudes temos também, as velocidades de rotação. Esse número é em torno de 150-200 vezes mais do que aquilo que existia antes da era Gaia.

É fornecida também, a análise dos dados de variabilidade para 10,5 milhões de estrelas distribuídas em 24 diferentes categorias, entre elas 15 mil Cefeidas e 270 mil RR Lyraes.

Na Figura 6, a seguir, vemos uma projeção do céu em coordenadas galácticas: no topo à esquerda a distribuição de velocidades radiais: nas regiões mais escuras as estrelas em média estão se aproximando de nós e nas regiões mais claras elas estão se afastando. No topo à direita, temos um mapa de extinção: as regiões azuladas significam baixa extinção, ou seja, baixa densidade de gás e poeira. Já nas regiões amarelas e negras (plano galáctico) alta densidade de gás e poeira e, portanto, alta extinção.

Na imagem, abaixo e à esquerda, novamente temos as regiões em azul onde o movimento médio das estrelas é de aproximação de nós e nas regiões avermelhadas ou mais claras é de afastamento. As linhas não são trajetórias, simplesmente uma justaposição dos movimentos das estrelas no céu, ou seja, um fluxo dos movimentos próprios das estrelas. Abaixo à direita temos o mapa que mostra como milhões de estrelas estão quimicamente distribuídas pelo céu. Podemos ver que muitas delas, em azul, são constituídas da matéria primordial (H e He) enquanto que as vermelhas, a exemplo do Sol, se formaram de material enriquecido pelas gerações anteriores de estrelas e dessa

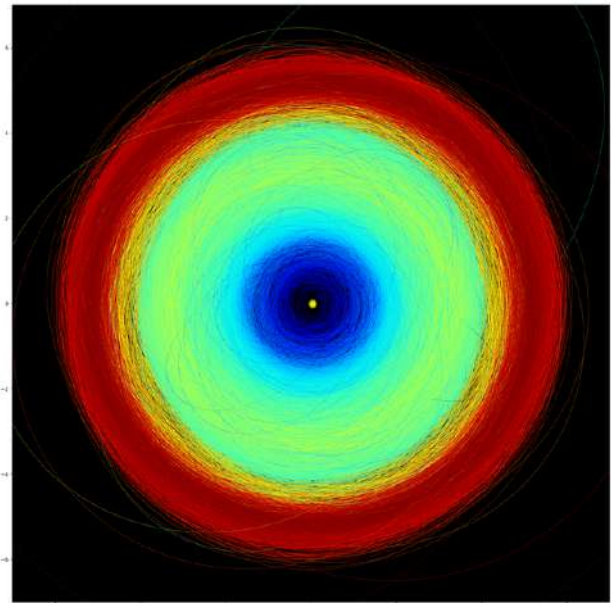


Figura 7: Órbitas dos asteroides observados pelo Gaia ao redor do Sol. A cor azul simboliza aqueles com periélios mais próximos do Sol e em vermelho aqueles com periélios mais distantes. Crédito: ESA/Gaia/DPAC.

forma são ricas em metal, lembrando que em astronomia tudo que é mais “pesado” que H e He é chamado de metal.

No que diz respeito ao Sistema Solar, temos a solução orbital para mais 150 mil corpos, incluindo as várias classes de asteroides e objetos transnetunianos [11]. Além disso, 31 satélites planetários e reflectância para mais de 60 mil objetos [9].

Na Figura 7, a seguir, podemos ver as órbitas desses corpos ao redor do Sol. O código de cores baseia-se na distância periélica, ou seja, a distância mínima que o asteroide se aproxima do Sol durante seu movimento: em azul temos aqueles cujos periélios são mais próximos do Sol e em vermelho os mais distantes.

Finalmente, uma outra grande novidade é o conteúdo extra-galáctico desse release. São 1,9 milhão de quasares com *redshifts* e brilhos sendo que para 60 mil deles foram detectadas as galáxias hospedeiras e para 15 mil delas foram determinadas características morfológicas. Além disso, foram observadas 2,9 milhões de galáxias e para 800 mil delas pudemos obter uma boa solução para o perfil de brilho e parâmetros morfológicos.

As posições dos quasares observados são essenciais na materialização do International Celestial Reference System [5] que antes das observações Gaia era materializado por apenas, pouco mais

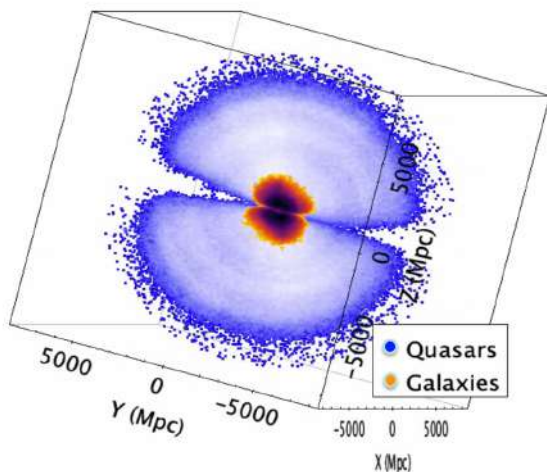


Figura 8: Distribuição espacial do conteúdo extragaláctico observado pelo satélite Gaia e analisado no âmbito da unidade Extended Object do DPAC. Naturalmente, a observação dos quasares vai muito mais longe devido à intensidade de seus brilhos. Crédito: C. Ducourant.

de 200 quasares observados em rádio. Esse referencial era então, estendido por referenciais secundários mais densos de base estelar no visível. Certamente, essa solução estava longe da materialização de um referencial ideal. Agora, temos um referencial primário com 1,6 milhões de quasares, observados no visível, onde se faz a maior parte da astronomia, com uma extensão de 1,8 bilhão de estrelas, igualmente no visível, observadas com o mesmo instrumento, a partir do espaço e com precisões extremas.

5 Parâmetros morfológicos de galáxias

A Missão Espacial Gaia foi concebida com foco principal na observação astrométrica precisa de objetos pontuais, essencialmente estrelas e quasares. Entretanto, além disso, como vimos, o satélite perfaz igualmente observações fotométricas e espectroscópica e também, observações de objetos não pontuais como asteroides e satélites do Sistema Solar, galáxias compactas e estrelas múltiplas não resolvidas. Devido às características “extravagantes” desses objetos eles se tornaram alvos de tratamentos específicos no âmbito do Gaia DPAC.

Os objetos extensos necessitam de um tratamento específico e foi nesse contexto que surgiu, a exemplo de outros, o grupo Extended Object (EO) - DU470 (Development Unit 470 - CU4)

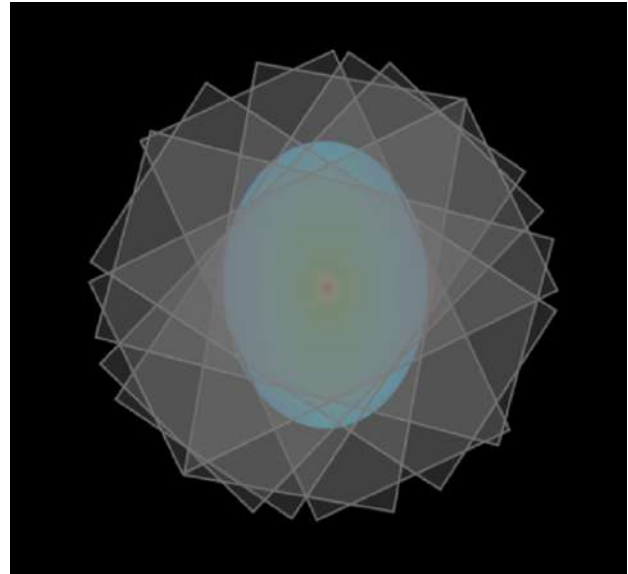


Figura 9: Ilustração dos diversos trânsitos observados de uma galáxia qualquer, nesta figura uma galáxia sintética.

visando o aproveitamento das observações de galáxias e de galáxias hospedeiras de quasares para extrair informações a respeito de suas morfologias. Em particular, a origem desse grupo reside na tese de doutorado do Dr. Alberto Krone Martins em co-tutela entre o IAG-USP e o Laboratoire d’Astrophysique de Bordeaux: “Ampliando os horizontes da Missão Espacial Gaia através das observações de galáxias” [17, 18].

Esse aspecto da missão espacial Gaia será abordado, ainda que grosseiramente, aqui pois por um lado, o conteúdo extragaláctico do Gaia é uma das grandes novidades do terceiro *release* e por outro, porque esse conteúdo é fruto dos esforços de uma colaboração brasileira, de longa data, com colegas de Bordeaux e de Nice. É justamente no trabalho desse grupo que reside a participação brasileira relevante no âmbito do projeto Gaia.

Os parâmetros morfológicos de um grande número de galáxias e de galáxias hospedeiras de quasares distribuídas por todo o céu constitui uma importante contribuição no estudo de suas formações e evoluções, do papel dos *merges*, da evolução cosmológica, da distribuição de massa no universo, da matéria escura, da relação buraco-negro supermassivo e galáxia hospedeira entre muitos outros tópicos.

De maneira bastante superficial a estratégia para se obter as informações sobre a morfologia das galáxias pode ser descrita como a reprodução dos vários trânsitos observados pelo satélite, preservando o ordenamento dos ângulos de varre-

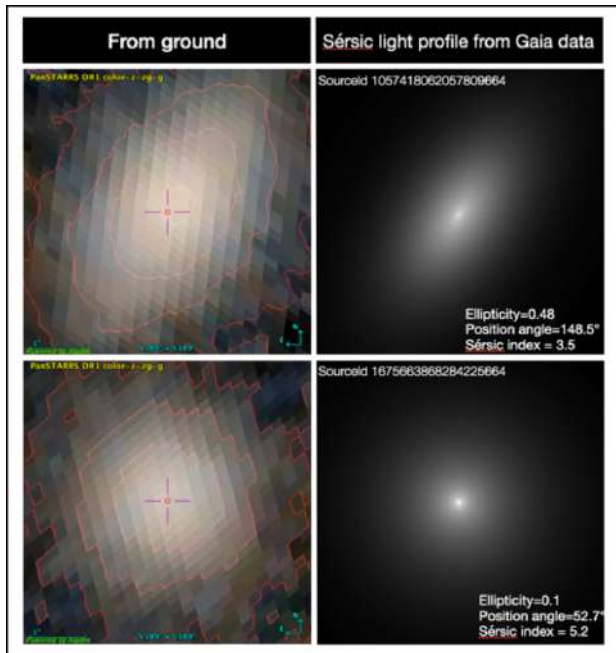


Figura 10: À esquerda galáxia real observada a partir do solo e à direita galáxia sintética construída com os parâmetros obtidos na melhor solução dentro da nossa estratégia. Crédito: C. Ducourant.

dura, sobre milhares de galáxias simuladas (sintéticas). A comparação do arranjo dos trânsitos organizados da galáxia real com aqueles da galáxia sintética fornecerá a melhor solução dos parâmetros morfológicos da galáxia real.

Na Figura 8, vemos as imagens de duas galáxias obtidas a partir do solo à esquerda e das correspondentes galáxias sintéticas ajustadas com os parâmetros resultantes da melhor solução alcançada com nossa estratégia.

Naturalmente, um primeiro passo nessa direção foi a identificação dos alvos, quasares e galáxias, no oceano de detecções Gaia. Para o terceiro *data release* temos uma classificação probabilística das fontes em cinco classes: estrela, galáxia, quasar, estrela binária ou anã branca [8]. No entanto, quando iniciamos o ciclo de processamentos dentro do Gaia DPAC, essa classificação não estava disponível que nos levou a configurar nossas listas de entrada com base no Gaia DR2 e em dados da literatura.

A lista de quasares foi configurada a partir de vários catálogos de quasares e candidatos a quasares resultando em pouco mais de 6 milhões de entradas sendo quase 2 milhões presentes no Gaia DR2. Esses objetos passaram ainda por um filtro astrométrico, paralaxes e movimentos próprios, resultando em uma lista final de aproxima-

damente 1,5 milhão de quasares e candidatos a quasares presentes no Gaia DR3.

A lista de galáxias por nós analisadas foi estabelecida por Krone-Martins et al. [19]. Este catálogo foi compilado usando um método totalmente não supervisionado baseado em um esquema iterativo estocástico especificamente adaptado para o problema de separação estrela-galáxia. Dessa forma, construiu-se um catálogo de fontes extragalácticas extensas contendo 1,7 milhão de objetos com uma correspondência no Gaia DR3.

Confirmando nossas previsões [20] a grande maioria das galáxias detectadas pelo satélite são principalmente as elípticas, mas também espirais abrigoando bojos brilhantes ou núcleos ativos. Os resultados obtidos foram divulgados e publicados juntamente com todo Gaia DR3 no dia 13 de junho de 2022 [7, 10].

No caso dos quasares foram detectadas 64,5 mil galáxias hospedeiras sendo que para 15,9 mil delas obtivemos uma solução robusta. Já para as galáxias, partimos de uma lista de 940,9 mil e obtivemos solução para 914,8 mil delas. Esses números são, sem sombra de dúvidas, bastante expressivos e relevantes.

A detecção de galáxias hospedeiras de quasares a partir do solo pode ser considerada rara, sobretudo no visível em comparação com o que alcançamos aqui. As galáxias analisadas aqui são, em geral, bastante compactas de tal forma que as perturbações atmosféricas em observações a partir do solo têm uma grande interferência em seus perfis de brilho, o que torna esse trabalho mais relevante ainda.

6 Futuro

Como dito, está previsto para 2025 a publicação do quarto Gaia *data release* correspondendo a 66 meses de observações, portanto, quase o dobro das observações que geraram o DR3 agora publicado. O tratamento dessas observações já se iniciou a mais ou menos 1 ano e mais uma vez, deveremos ter um conteúdo bastante enriquecido em categorias de objetos, exoplanetas por exemplo, e em precisão.

As chances de estender a missão por mais 3 anos, perfazendo um total de 10 anos, são muito grandes. Entretanto, independentemente, dessa prorrogação ser decidida positivamente, o satélite, até esse momento, não parou de varrer o céu

o que permitiu acumular em torno de 95 meses de observações. Em outras palavras, uma boa parte dos dados para um quinto *data release* não previsto originalmente, já está assegurada e armazenada em solo. A data para a publicação desse novo *release* não está definida, mas se fala em algo por volta de 2030.

Por outro lado, já se discute, desde o lançamento do satélite Gaia em 2013, um segundo satélite Gaia e, naturalmente, muitas propostas têm surgido.

A proposta que parece mais forte neste momento é a do projeto NIR que consiste em um satélite que guarda os princípios observacionais do Gaia, mas com muitos outros recursos incluindo observações no infravermelho próximo - All-Sky Visible and Near Infrared Space Astrometry - NIR.

Um tal projeto, permitiria, entre outras, acessar regiões escuras da Galáxia, observar 5 vezes mais objetos do que o Gaia atual, ou seja, passar de 2 para 10 bilhões de objetos, alcançar melhores precisões, em movimento próprio por exemplo seria melhorada de um fator 20, detectar padrões até agora invisíveis nos movimentos das estrelas, mapear matéria escura, etc.

Naturalmente, esse novo projeto, caso seja aceito agora, só será realidade dentro de 15 a 20 anos.

7 Considerações

O projeto Gaia foi concebido com o objetivo de produzir uma verdadeira revolução na base de dados sobre a qual repousa a astronomia e consequentemente na visão que temos da Galáxia e do Universo como um todo, através de observações astrométricas, fotométricas e espectroscópica extremamente precisas e repetidas ao longo do tempo.

Os seguidos *data releases* como este disponibilizado para o mundo inteiro ao mesmo tempo em 13 de junho de 2022 (Gaia DR3), nos permitem de maneira muito mais realística do que antes, descrever e caracterizar o Sistema Solar e sua vizinhança, contar a história e descrever a estrutura de nossa galáxia, detectar exoplanetas, estabelecer um referencial homogêneo, rígido e muito próximo de um inercial, caracterizar o universo extragaláctico próximo e distante com as observações de galáxias, quasares e galáxias hospedeiras

de quasares.

A bordo do satélite Gaia temos dois telescópios especiais com um plano focal comum onde se encontram 3 instrumentos que realizam medidas astrométricas (posição, distância e movimentos) e fotométricas (brilho em luz branca), fotoespectrométricas (brilho, cor e espectro de baixa resolução) e espectroscópicas (velocidades radiais e composição química). Essas observações repetidas ao longo do tempo permitem alcançar precisões até bem pouco tempo inimagináveis. Por exemplo, a grandeza mais importante da astronomia, a paralaxe estelar que fornece a distância e calibra a escala de distância do Universo, é medida com precisões de microssegundos de grau.

Os dados do Gaia são disponibilizados para o mundo todo ao mesmo tempo. Qualquer pessoa pode acessá-los. Esses dados são superabundantes e nos dão a liberdade de, eventualmente, selecionar os melhores entre eles e mesmo assim continuar trabalhando com uma amostra robusta. Tudo que falarmos a respeito do Sistema Solar, da Via Láctea e do Universo, será mais realístico e confiável a partir desses dados que provavelmente sustentarão a astronomia nos próximos 20-30 anos.

São justamente a abundância de dados, a precisão das medidas e a variedade de objetos observados (praticamente todo tipo de corpo celeste existente) que asseguram esse caráter revolucionário das observações Gaia, colocando em nossas mãos, uma vez mais na História da astronomia, a riqueza de informações contida na luz dos astros.

Agradecimentos

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Comité Français d'Évaluation de la Coopération Universitaire e Scientifique avec le Brésil (COFECUB) e ao Laboratório de Astroinformática do IAG-USP pelo apoio material e logístico à minha participação no Gaia-DPAC.

Sobre o autor

Ramachrisna Teixeira (rama.teixeira@iag.usp.br) é Professor Associado do Departamento de Astronomia do Instituto de Astronomia,

Geofísica e Ciências Espaciais (IAG) da Universidade de São Paulo (USP). Tem Graduação em Física pela USP, Mestrado em Astronomia pelo IAG-USP, Doutorado em Astronomia e Astrofísica pela Universidade de Bordeaux I (França) e Livre Docência pelo IAG-USP. É membro ativo do Gaia Data Processing and Analysis, atuando no grupo Extended Objects - EO - DU470.

Referências

- [1] Gaia Collaboration et al., *The Gaia mission*, *Astronomy & Astrophysics* **595**, A1 (2016). [ArXiv:1609.04153](#).
- [2] Gaia Collaboration et al., *Gaia data release 1 - summary of the astrometric, photometric, and survey properties*, *A&A* **595**, A2 (2016).
- [3] A. G. Brown, *Microarcsecond astrometry: Science highlights from Gaia*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **59**(1), 59 (2021).
- [4] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties*, *Astronomy & Astrophysics* **616**, A1 (2018). [ArXiv:1804.09365](#).
- [5] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 2. The celestial reference frame (Gaia-CRF2)*, *Astronomy & Astrophysics* **616**, A14 (2018). [ArXiv:1804.09377](#).
- [6] Gaia Collaboration et al., *Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties*, *Astronomy & Astrophysics* **649**, A1 (2021). [ArXiv:2012.01533](#).
- [7] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 3: The extragalactic content* (2022). [ArXiv:2206.05681](#).
- [8] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 3: A golden sample of astrophysical parameters* (2022). [ArXiv:2206.05870](#).
- [9] Gaia Collaboration et al., *Gaia Data Release 3: Reflectance spectra of Solar System small bodies* (2022). [ArXiv:2206.12174](#).
- [10] C. Ducourant et al., *Gaia Data Release 3: Surface brightness profiles of galaxies and host galaxies of quasars* (2022). [ArXiv:2206.14491](#).
- [11] P. Tanga et al., *Data Release 3: the Solar System survey* (2022). [ArXiv:2206.05561](#).
- [12] *The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission*, vol. 1200 de *ESA Special Publication* (ESA Publications Division, 1997).
- [13] B. Viateau et al., *The Bordeaux and Valinhos CCD meridian circles*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **134**, 173 (1999).
- [14] L. Lindegren et al., *Gaia Data Release 1. Astrometry: One billion positions, two million proper motions and parallaxes*, *Astronomy & Astrophysics* **595**, A4 (2016). [ArXiv:1609.04303](#).
- [15] E. Høg et al., *The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars*, *Astronomy & Astrophysics* **355**, L27 (2000).
- [16] D. Michalik, L. Lindegren e D. Hobbs, *The Tycho-Gaia astrometric solution. How to get 2.5 million parallaxes with less than one year of Gaia data*, *Astronomy & Astrophysics* **574**, A115 (2015). [ArXiv:1412.8770](#).
- [17] A. Krone-Martins, *Ampliando horizontes da Missão Espacial Gaia graças à análise de objetos extensos*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo e Université de Bordeaux I, São Paulo (2011).
- [18] A. Krone-Martins et al., *Pushing the limits of the Gaia space mission by analyzing galaxy morphology*, *Astronomy & Astrophysics* **556**, A102 (2013). [ArXiv:1307.5732](#).
- [19] A. Krone-Martins et al., *Identification of galaxies from the Gaia DR2 - ALLWISE all-sky catalogues with unsupervised machine-learning*, (a ser publicado).
- [20] R. E. de Souza et al., *Detection of galaxies with Gaia*, *Astronomy & Astrophysics* **568**, A124 (2014). [ArXiv:1404.4521](#).

O Telescópio Espacial James Webb: uma nova era na astronomia

Jaziel G. Coelho

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

O Telescópio Espacial James Webb (JWST) é um telescópio espacial no infravermelho de 6,5 m lançado em 25 de dezembro de 2021. Desde seu lançamento e ainda com a divulgação das primeiras imagens de calibração, o JWST já nos impactava enormemente. Meses depois, em 12 de julho de 2022, o mundo recebia atônito as primeiras imagens coloridas dessa nova janela de observação do cosmos. Nesta e nas próximas décadas, o JWST produzirá impacto em todos os campos da astrofísica. Equipado com quatro instrumentos científicos exclusivos, fornecendo uma ampla variedade de recursos de imagem e capacidades espectroscópicas cobrindo a faixa de comprimento de onda de 0,6 a 28 microns, o JWST fornecerá sensibilidade sem precedentes para sondar o Universo primitivo, entender a origem e evolução de galáxias, aquelas que surgiram apenas algumas centenas de milhões de anos após o Big Bang. O JWST nos permitirá estudar a formação de estrelas, buracos negros, matéria escura, sistemas protoplanetários, exoplanetas e a origem da vida. Este artigo fornece uma breve visão geral da missão do JWST. Duas décadas depois de iniciar o desenvolvimento deste poderoso observatório espacial por meio de uma parceria internacional liderada pelos Estados Unidos, em colaboração com a Europa e o Canadá, a missão científica central do JWST inaugura uma nova era da astronomia. Além disso, o JWST é uma missão de referência que irá orientar o desenvolvimento de futuros observatórios espaciais internacionais emblemáticos, bem como telescópios terrestres gigantes.

Abstract

The James Webb Space Telescope (JWST) is a 6.5 m infrared space telescope launched on December 25, 2021. Since its launch and with the release of the first calibration images, the JWST has already impacted us enormously. Months later, on July 12, 2022, the world was amazed to receive the first color images of this new window of observation of the cosmos. In this and the coming decades, the JWST will impact all fields of astrophysics. Equipped with four unique science instruments, providing a wide range of imaging and spectroscopic capabilities covering the 0.6 to 28 micron wavelength range, the JWST will provide unprecedented sensitivity to probe the early Universe, understand the origin and evolution of galaxies, those that emerged just a few hundred million years after the Big Bang. JWST will study star formation, black holes, dark matter, protoplanetary systems, exoplanets and the origin of life. This article provides a brief overview of the JWST mission. Two decades after starting the development of this powerful space observatory through an international partnership led by the United States, in collaboration with Europe and Canada, the JWST's core science mission ushers in a new era of astronomy. In addition, the JWST is a landmark mission that will guide the development of future international space observatories as well as giant ground-based telescopes.

Palavras-chave: James Webb, astronomia infravermelha, galáxias, universo

Keywords: James Webb, infrared astronomy, galaxies, universe

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38762](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38762)

1 Introdução

O lançamento do Telescópio Espacial James Webb (da sigla em inglês, JWST) representa uma conquista significativa para a humanidade e a abertura de uma nova era na astronomia. O JWST nos permitirá abordar questões fundamentais sobre a natureza do Universo e o ciclo cósmico de estrelas, planetas e a vida.

O JWST é um projeto de 25 anos, renome-

ado em 2002, em honra a um antigo administrador da NASA, James Edwin Webb, que liderou o programa Apollo, além de outras importantes missões espaciais. Com um espelho de 6,5 metros e instrumentação que opera em comprimentos de onda do infravermelho (IR), o JWST é 100 vezes mais poderoso que seus antecessores imediatos, os telescópios espaciais Hubble e Spitzer, que são dois dos grandes observatórios lançados nas últimas três décadas. Ele consegue detectar luz

infravermelha gerada por galáxias quando estas foram formadas a 13,5 bilhões de anos atrás.

Observar comprimentos de onda infravermelhos é notavelmente desafiador, pois qualquer objeto quente também emite infravermelho que pode facilmente submergir um sinal distante vindo do espaço. Assim, a atmosfera da Terra cria um fundo térmico, assim como os instrumentos e telescópios necessários para realizar as observações. Esse “ruído” de fundo térmico efetivamente cega os detectores de infravermelho de ver fontes como estrelas recém-formadas. A astronomia no IR, portanto, depende fortemente do lançamento de telescópios refrigerados. No entanto, as limitações físicas dos lançamentos espaciais impõem restrições de tamanho do telescópio. O design dobrável do espelho de 6,5 m a bordo do JWST supera essas limitações por apresentar o ganho de sensibilidade mais substancial na história da astronomia no IR.

Quando você olha para o céu, mesmo que esteja situado no vale da floresta mais escura da Terra, você não está vendo todas as estrelas. E não é porque algumas das estrelas não estão no seu campo de visão. Elas estão lá - mas são invisíveis. Os olhos humanos só podem visualizar comprimentos de onda de luz dentro de uma certa região do espectro eletromagnético. Logo além desta região encontra-se a luz infravermelha. E galáxias e estrelas que estão muito, muito distantes emitem exatamente esse tipo de luz - então elas estão essencialmente escondidas aos nossos olhos, não importa o que tentemos fazer.

Mas o Hubble e o JWST também têm uma maneira de contornar nossa restrição humana. Os cientistas incorporaram detectores de luz infravermelha nestes dois instrumentos. Observando a Figura 1, vemos o enorme poder do JWST no infravermelho - e é por isso que ele tem potencial para nos mostrar informações muito além de nossos olhos.

A missão primária do JWST será a de examinar a radiação infravermelha resultante da grande expansão e realizar observações sobre os primórdios do Universo. Ele irá nos permitir determinar como e por que nuvens de poeira e gás colapsam em estrelas ou tornam-se planetas gigantes gasosos ou anãs marrons, conhecidos como ciclos estelares. Sua excelente sensibilidade permitirá aos astrônomos investigar diretamente os primeiros estágios do nascimento das estrelas, conhecidos

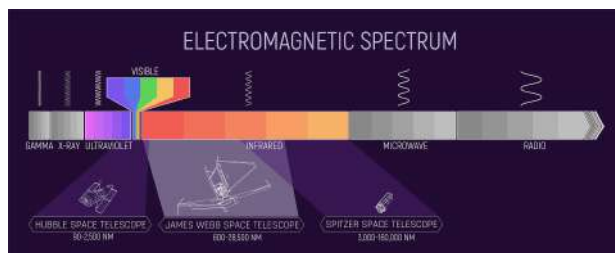


Figura 1: Espectro da energia eletromagnética, destacando as porções detectadas pelos telescópios espaciais Hubble, Spitzer e Webb da NASA. Créditos: NASA e J. Olmsted [STScI].

como “núcleos protoestelares”. Poderemos estudar também um dos eventos mais energéticos conhecidos do Universo, as explosões de supernova, que são mortes explosivas de estrelas massivas. Essas futuras observações irão nos permitir entender como e onde as estrelas se formam e morrem.

Outras faixas maiores de frequência tendem a sofrer mais interferência dessas partículas de poeira, pois apesar do Universo imenso, pequenas partículas no caminho da radiação podem contribuir para obtenção de imagens pouco nítidas. Devido ao *redshift* (o desvio para o vermelho cosmológico), e também devido ao poder de penetração que essa radiação possui em atravessar nuvens de poeira cósmica e galáxias, permitirá ao James Webb observar objetos mais obscuros e frios. O JWST será o principal observatório em IR das próximas décadas. Ele estudará todas as fases da história do nosso Universo, desde os primeiros brilhos luminosos após o Big Bang, até a formação de sistemas solares capazes de sustentar a vida em planetas como a Terra.

O JWST é um projeto internacional liderado pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA), dos Estados Unidos, e com contribuições significativas da Agência Espacial Europeia (ESA) e da Agência Espacial Canadense (CSA). As observações e dados que estão sendo coletados pelo JWST estão abertos à comunidade científica mundial, incluindo astrônomos brasileiros que estão liderando algumas das primeiras observações com o Telescópio James Webb. Essas primeiras observações fazem parte do que é chamado de “*Director’s Discretionary Early Release Science (DD-ERS) Program*”¹ e foram seleciona-

¹Para ver detalhes de um programa específico acesse <https://www.stsci.edu/jwst/science-execution/approved-ers-programs>.

das para mostrar o potencial científico do JWST.

Neste breve artigo, irei discutir a relevância do JWST para a comunidade astronômica e o impacto de suas descobertas para o avanço do conhecimento. Início a Seção 2 explicando brevemente o funcionamento do JWST. Na Seção 3 reviso os principais acontecimentos desde o seu lançamento em 2021. Na Seção 4, apresento as primeiras imagens divulgadas pelo JWST e discuto o impacto dessas descobertas. Por fim, na última seção, discorro brevemente sobre o que podemos esperar do JWST e da nova era da astronomia que inicia-se.

2 Como JWST funciona?

Antes que o JWST possa fazer seu trabalho, ele teve que primeiro chegar ao espaço. O telescópio foi lançado a bordo do foguete europeu Ariane 5, que possui uma carenagem de carga útil, ou cone de nariz, com 5,4 metros de diâmetro – um dos maiores do mundo. Isso ainda não é largo o suficiente para o espelho de 6,5 metros do JWST, que consiste em 18 segmentos hexagonais dispostos como um favo de mel (veja Figura 2). Três segmentos de cada lado dobraram-se para trás para que o telescópio pudesse caber. Outras partes do JWST também foram empacotadas para o lançamento, tornando-se uma espaçonave contorcionista. Os três suportes que seguram o espelho secundário do telescópio se dobram. O guarda-sol do tamanho de uma quadra de tênis se dobra e se enrola em um pacote apertado que depende de um processo de várias etapas para desembalar-se. Outros componentes incluem os painéis solares do telescópio, uma antena e radiadores que desviam calor extra para o espaço.²

Para cientistas, engenheiros e fãs do espaço, assistir ao JWST descompactar foi uma experiência de roer as unhas. O telescópio não poderia ser visitado por astronautas se algo desse errado. O sucesso, no entanto, abrirá caminho para implantações espaciais semelhantes e mais complexas, o que beneficiará futuras missões de exploração do Universo.

Para ver a luz infravermelha, o JWST precisa bloquear o calor do Sol e de seus próprios instrumentos. A primeira linha de defesa é um protetor solar de cinco camadas, que mantém o telescópio

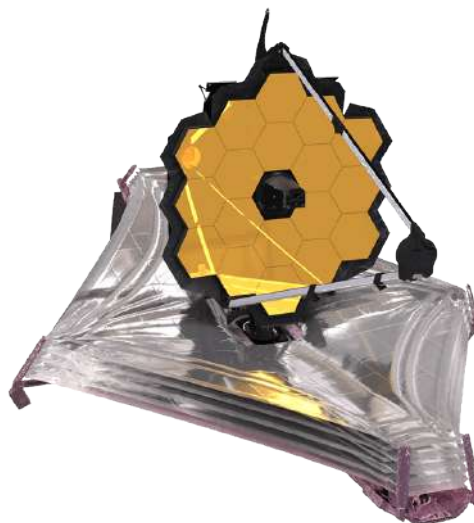


Figura 2: Telescópio Espacial James Webb. Créditos: NASA, ESA, CSA, e STScI.

resfriado a -233 graus Celsius (-388 graus Fahrenheit). De relance, o protetor solar do JWST se parece um pouco com a vela solar a bordo da espaçonave *LightSail* da *Planetary Society*.³ Embora o protetor solar do JWST não seja usado para propulsão, os raios do Sol ainda o empurram, de modo que a espaçonave possui uma guia de compensação refletiva que se abre em um ângulo diferente para ajudar a compensar as forças da radiação solar.

Mas mesmo um protetor solar não é suficiente, pois o JWST também precisa bloquear a luz da Terra e da Lua, o que é difícil na órbita da Terra. Portanto, o JWST viajou para um local especial chamado Ponto de Lagrange (L2), a 1,5 milhão de quilômetros de distância. Lá, a gravidade do Sol e da Terra se equilibram de uma maneira que permite que o JWST mantenha permanentemente o Sol, a Terra e a Lua nas costas, enquanto observa o cosmos.

Assim que o JWST chega em L2 com seus instrumentos e equipamentos implantados, a diversão começa. A luz de objetos distantes reflete em seus espelhos hexagonais, que são revestidos com uma fina camada de ouro para ajudá-lo a enxergar melhor no infravermelho. A luz viaja até um espelho secundário, que a focaliza em um feixe do tamanho de um prato de jantar, enviando-o de volta através de um orifício no centro do espelho primário. A partir daí, é focado ainda mais e pode ser analisado através de 4 instrumentos científicos diferentes.

²Explore todas essas informações e os modos de operação do JWST em <https://webb.nasa.gov/index.html>.

³<https://www.planetary.org/sci-tech/light sail>.

Quanto mais distantes estão os objetos, mais tempo leva para que sua luz chegue até nós, ou seja, quando olhamos para uma galáxia distante, estamos realmente vendo como era aquela galáxia no passado. Quando você olha para a Lua, você a vê como ela existia 1 segundo atrás. A luz do Sol que aquece seu rosto em um belo dia leva oito minutos até que chegue em você. A Galáxia de Andrômeda, é na verdade 2,5 milhões de anos mais velha do que parece agora. O JWST pode ver galáxias com até 13,4 bilhões de anos, apenas 400 milhões de anos após o Big Bang. Galáxias a esta distância estão rapidamente se afastando de nós devido à expansão do Universo. Isso torna o comprimento de onda de sua luz mais longo devido ao efeito Doppler – o mesmo fenômeno que faz com que uma sirene de ambulância soe mais aguda quando se aproxima de você e mais grave depois que passa por você.

A luz de comprimento de onda longos de objetos formados ainda mais perto do Big Bang é deslocada para o infravermelho. O JWST pode ver objetos até 100 milhões de anos após o Big Bang, quando o Universo ainda era muito jovem, o que nos ajudará a entender melhor nossa história e origem cósmica.

3 O que aconteceu desde o lançamento do telescópio?

O James Webb foi lançado no dia 25 de Dezembro de 2021 e partiu em sua viagem espacial de 30 dias, saindo da Guiana Francesa com ponto de chegada localizado a 1,5 milhões de km da Terra, conhecido como segundo ponto de Lagrange (L2). O telescópio chegou a L2 em 24 de janeiro de 2022. Como mencionado, os pontos de Lagrange são posições no espaço onde a atração gravitacional do Sol e da Terra é equilibrada por forças orbitais, fornecendo localizações estáveis para as espaçonaves. L2 segue a Terra em torno do Sol e JWST seguirá uma chamada “órbita de halo” em torno de L2, enquanto L2 orbita o Sol. O ponto L2 tem sido um local popular para vários outros telescópios espaciais, incluindo o Telescópio Espacial Herschel e o Observatório Espacial Planck.

Após o lançamento, a equipe iniciou o longo processo de mover o telescópio para sua posição orbital final, desdobrando o telescópio e – à medida que tudo esfriava – calibrando as câmeras e

sensores a bordo. O lançamento foi bastante suave e um verdadeiro sucesso. Uma das primeiras coisas que a equipe notou foi que o telescópio tinha mais combustível restante a bordo do que o previsto para fazer ajustes futuros em sua órbita. Isso permitirá que o JWST opere por muito mais tempo do que a meta inicial de 10 anos da missão.

A primeira tarefa durante a jornada de um mês do JWST até sua localização final em órbita foi desdobrar o telescópio. Isso ocorreu sem problemas, começando com o desdobramento do escudo solar que ajuda a resfriar o telescópio, seguido pelo alinhamento dos espelhos e a ativação dos sensores.

Uma vez que o protetor solar foi aberto, a equipe começou a monitorar as temperaturas das quatro câmeras e espectrômetros a bordo, esperando que atingissem temperaturas baixas o suficiente para que pudesse começar a testar cada um dos diferentes modos em que os instrumentos podem operar.

As câmeras no JWST esfriaram exatamente como os engenheiros previram, e o primeiro instrumento que a equipe ligou foi a *Near Infrared Camera* – ou NIRC*am*. A NIRC*am* foi projetada para estudar a fraca luz infravermelha produzida pelas estrelas ou galáxias mais antigas do Universo. Mas antes que pudesse fazer isso, a NIRC*am* teve que ajudar a alinhar os demais segmentos individuais do espelho do JWST.

Uma vez que a NIRC*am* esfriou, estava fria o suficiente para começar a detectar a luz refletida nos segmentos do espelho do JWST e produzir as primeiras imagens do telescópio. A equipe da NIRC*am* ficou em êxtase quando a primeira imagem de luz chegou. Essas imagens mostraram que os segmentos do espelho estavam todos apontando para uma área relativamente pequena do céu. O sensor de orientação fina do JWST também entrou em operação neste momento. Este sensor ajuda a manter o telescópio apontando firmemente para um alvo – muito parecido com a estabilização de imagem em câmeras digitais comuns. Quando o alinhamento do espelho terminou em 11 de março, o *Near Infrared Spectrograph* – NIRS*pec* – e o *Near Infrared Imager and Slitless Spectrograph* – NIRS*pec* – terminaram de esfriar e se juntaram à festa.

O NIRS*pec* foi projetado para medir a intensidade de diferentes comprimentos de onda da luz proveniente de um alvo. Esta informação pode

revelar a composição e temperatura de estrelas e galáxias distantes. O NIRSpec faz isso olhando para o objeto alvo através de uma fenda que mantém a luz afastada. O instrumento possui várias fendas que permitem ver 100 objetos de uma só vez. Os membros da equipe começaram testando o modo de múltiplos alvos, comandando as fendas para abrirem e fecharem, e confirmaram que as fendas estavam respondendo corretamente aos comandos.

O NIRISS é um espectrógrafo sem fenda que também quebra a luz em seus diferentes comprimentos de onda, mas é melhor para observar todos os objetos em um campo, não apenas aqueles nas fendas. Possui vários modos, incluindo dois projetados especificamente para estudar exoplanetas, particularmente próximos de suas estrelas-mãe.

O último instrumento a ser inicializado foi o *Mid-Infrared Instrument*, ou MIRI. O MIRI foi projetado para tirar fotos de galáxias distantes ou recém-formadas, bem como de objetos pequenos e fracos, como asteroides. Este sensor detecta os comprimentos de onda mais longos dos instrumentos do JWST e deve ser mantido muito próximo do zero absoluto. Se estivesse mais quente, os detectores captariam apenas o calor do próprio instrumento, e não os objetos que estamos interessados no Universo (veja Figura 3). O MIRI tem seu próprio sistema de resfriamento, que precisou de mais tempo para se tornar totalmente operacional antes que o instrumento pudesse ser ligado.

Operando à temperaturas extremamente baixas, o MIRI é incrivelmente sensível à luz na faixa do infravermelho médio, que pode passar pela poeira com mais facilidade. Sabemos que existem galáxias completamente escondidas pela poeira e indetectáveis por telescópios como o Hubble. Quando essa sensibilidade é combinada com o grande espelho do James Webb, podemos penetrar nessas nuvens de poeira e observar estrelas e estruturas dessas galáxias pela primeira vez.

A partir de 15 de junho de 2022, todos os instrumentos do JWST estavam ligados e fizeram suas primeiras imagens.

4 As primeiras imagens

No dia 12 de julho de 2022, um dia memorável para a astronomia, a NASA revelou as primeiras

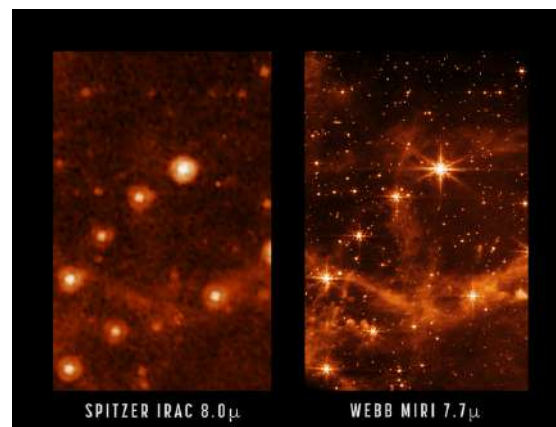


Figura 3: A câmera MIRI, imagem à direita, permite que os astrônomos vejam através de nuvens de poeira com incrível nitidez em comparação com telescópios anteriores, como o Telescópio Espacial Spitzer, que produziu a imagem à esquerda. Créditos: NASA/JPL-Caltech (esquerda), NASA/ESA/CSA/STScI (direita).

imagens dos objetos cósmicos, oferecendo visões detalhadas e sem precedentes, como comentadas nas próximas seções:

4.1 SMACS 0723

O primeiro campo profundo do JWST é o aglomerado de galáxias SMACS 0723 (ver Figura 4), e está repleto de milhares de galáxias. A imagem infravermelha mais profunda e nítida do Universo distante até agora – incluindo os objetos mais fracos já observados no infravermelho.

Como divulgado pela NASA, a imagem do campo profundo do JWST é aproximadamente do tamanho de um grão de areia mantido à distância de um braço. A massa combinada deste aglomerado de galáxias atua como uma lente gravitacional, ampliando galáxias mais distantes, incluindo algumas vistas quando o Universo era ainda muito jovem. Este campo profundo, obtido pela NIRCам do JWST, é uma composição feita a partir de imagens em diferentes comprimentos de onda, totalizando 12,5 horas – alcançando profundidades em comprimentos de onda infravermelhos além dos campos mais profundos do Hubble, que levou semanas. E estamos apenas no início da era do JWST. Os pesquisadores farão exposições mais longas, revelando muito mais do nosso vasto Universo.

A luz dessas galáxias levou bilhões de anos para chegar até nós. Estamos olhando para trás no tempo, cuja luz foi emitida quando o Universo tinha poucas centenas de milhões de anos. A luz foi



Figura 4: Esta imagem mostra o aglomerado de galáxias SMACS 0723 como apareceu há 4,6 bilhões de anos. Muito mais sobre esse *cluster* vem sendo revelado à medida que os pesquisadores começaram a investigar os dados do JWST. Este campo também foi fotografado pelo MIRI do JWST, que observa a luz no infravermelho médio. A NIRCam do JWST revelou galáxias distantes e estruturas minúsculas e fracas que nunca foram observadas antes. Créditos: NASA, ESA, CSA, e STScI.

esticada pela expansão do Universo para comprimentos de onda infravermelhos que o JWST foi projetado para observar. Os pesquisadores em breve começarão a aprender mais sobre as massas, idades, evolução e composições das galáxias.

O campo profundo também foi imageado pelo instrumento MIRI do JWST oferecendo um caleidoscópio de cores. Galáxias azuis contêm estrelas, mas muito pouca poeira. Os objetos vermelhos neste campo estão envoltos em espessas camadas de poeira. Galáxias verdes são povoadas com hidrocarbonetos e outros compostos químicos. Os pesquisadores poderão usar dados como esses para entender como as galáxias se formam, crescem e se fundem e, em alguns casos, por que elas param de formar estrelas completamente.

Além de capturar imagens, dois instrumentos do JWST também obtiveram espectros – dados que revelam as propriedades físicas e químicas dos objetos que ajudarão os pesquisadores a identificar muito mais detalhes sobre galáxias distantes nesse campo. Os dados revelaram a luz de uma galáxia que viajou por 13,1 bilhões de anos an-

tes que os espelhos do JWST a capturassem.⁴ Os dados do NIRSpec também demonstram quão detalhados serão os espectros de galáxias com as observações do JWST.

4.2 WASP-96 b (*spectrum*)

O JWST também capturou a assinatura de água, juntamente com evidências de nuvens e neblina, na atmosfera ao redor de um planeta gigante gasoso quente orbitando uma estrela distante parecida com o Sol, conhecido como WASP-96 b.

WASP-96 b é um dos mais de 5.000 exoplanetas confirmados na nossa Galáxia e representa um tipo de gigante gasoso que não tem análogo

⁴Ainda durante a redação deste artigo, pesquisadores usando dados do JWST descobriram candidatas com *redshifts* de $z \sim 14$ e $z \sim 16$ há apenas algumas centenas de milhões de anos após o Big Bang. Isso significa que o JWST vem quebrando o seu próprio recorde e chegando cada vez mais perto do início de tudo. Esses trabalhos podem ser encontrados na plataforma arXiv de periódicos pré-print (ainda em processo de revisão por pares), veja Refs. [1, 2].

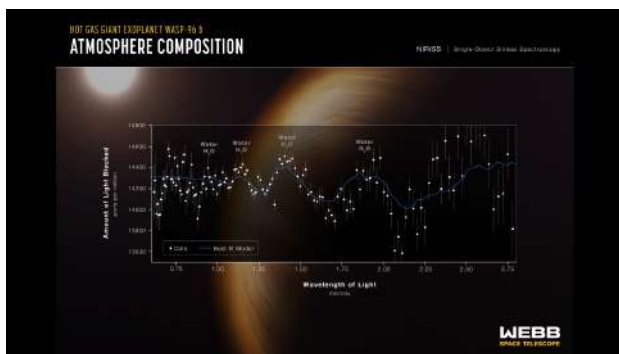


Figura 5: O espectro do WASP-96 b observado pelo NIRISS é o espectro de transmissão próximo ao infravermelho mais detalhado de uma atmosfera de exoplaneta já observada. Além disso, também cobre uma gama de comprimentos de onda, incluindo luz vermelha visível e uma parte do espectro que não foi anteriormente acessível a partir de outros telescópios (comprimentos de onda maiores que 1,6 microns). Esta parte do espectro é particularmente sensível à água, bem como a outras moléculas como oxigênio, metano e dióxido de carbono, que não são imediatamente óbvios no espectro WASP-96 b, mas que devem ser detectáveis em outros exoplanetas planejados para observação pelo JWST. Créditos: NASA, ESA, CSA, e STScI.

direto em nosso Sistema Solar. As observações, que revelaram a presença de vapor d'água, é a mais detalhada de seu tipo até hoje. Isso demonstra o impacto sem precedentes do JWST em analisar atmosferas a 1.150 anos-luz de distância. Enquanto o Telescópio Espacial Hubble analisou várias atmosferas de exoplanetas nas últimas duas décadas, com a primeira detecção clara de água em 2013, a observação imediata e mais detalhada do JWST marca um salto gigantesco na busca de caracterizar planetas com possibilidade de vida além do nosso.

Em 21 de junho, o NIRISS do JWST mediu a luz do sistema WASP-96 por 6,4 horas enquanto o planeta se movia pela estrela. O espectro de transmissão revela detalhes anteriormente ocultos da atmosfera: a assinatura inequívoca da água, indícios de neblina, e evidências de nuvens que se pensava não existirem com base em observações anteriores (ver Figura 5).

Átomos e moléculas têm padrões característicos de comprimentos de onda que absorvem, da mesma forma que as pessoas têm impressões digitais e sequências de DNA distintas. Assim, podemos usar o espectro para medir a quantidade de vapor de água na atmosfera, restringir a abundância de vários elementos como carbono e oxigênio e estimar a temperatura da atmosfera. Além

disso, pode-se especular sobre a composição geral do planeta, sua origem e formação. Segundo o JWST, a linha azul na Figura 5 é um modelo de melhor ajuste que leva em consideração os dados, as propriedades conhecidas de WASP-96 b e sua estrela, e características assumidas da atmosfera.

A riqueza de detalhes dessas medições só são possíveis devido ao design de última geração do JWST. Seu espelho revestido de ouro coleta a luz infravermelha de forma eficiente. Seus espectrógrafos de precisão espalham a luz em arco-íris de milhares de cores infravermelhas. E seus incríveis detectores infravermelhos medem diferenças extremamente sutis de brilho. O NIRISS é capaz de detectar diferenças de cor de apenas cerca de um milésimo de micron (a diferença entre verde e amarelo é de cerca de 50 milésimos de micron), e diferenças de brilho entre essas cores de algumas centenas de partes por milhão.

4.3 Nebulosa Carina

Outro alvo é a Nebulosa Carina (ver Figura 6), um berçário de estrelas se formando e repleto de estrelas massivas que ajudam a torná-la uma das maiores e mais brilhantes nebulosas do céu. Esta paisagem de “picos” e “vales” recheados de estrelas é na verdade a borda de uma região jovem e próxima de formação de estrelas, chamada NGC 3324 na Nebulosa Carina.

Localizada a cerca de 7.600 anos-luz de distância, a NGC 3324 foi fotografada pela NIRCcam e pelo MIRI. A NIRCcam – com sua resolução nítida e sensibilidade incomparável – revela centenas de estrelas anteriormente escondidas e até inúmeras galáxias de fundo. Na visão do MIRI, estrelas jovens e seus discos empoeirados formadores de planetas brilham no infravermelho médio, aparecendo rosa e vermelho. O MIRI revela estruturas que estão embutidas na poeira. A poeira quente, hidrocarbonetos e outros compostos químicos na superfície das cristas brilham, dando a aparência de rochas irregulares. NGC 3324 foi catalogado pela primeira vez por James Dunlop em 1826. Visível do Hemisfério Sul, está localizado no canto noroeste da Nebulosa Carina (NGC 3372), que reside na constelação de Carina. A Nebulosa Carina é o lar da estrela supergigante ativa e instável chamada Eta Carinae.⁵

⁵Todas as imagens divulgadas pelo JWST podem ser exploradas em detalhes no formato com zoom de alta resolução em <https://webbtelescope.org/news/first->



Figura 6: Esta paisagem de “montanhas” e “vales” é na verdade a borda de um berçário estelar próximo chamado NGC 3324 no canto noroeste da Nebulosa Carina. Créditos: NASA, ESA, CSA, e STScI.

Esta imagem revela pela primeira vez regiões de nascimento de estrelas que nunca foram observadas. Os pontos mais proeminentes têm cerca de 7 anos-luz de altura. Pasmem! As regiões que parecem cavernas foram esculpidas na nebulosa pela intensa radiação ultravioleta e ventos estelares de estrelas jovens extremamente massivas e quentes. Essa intensa radiação ultravioleta está esculpindo a parede da nebulosa, erodindo-a lentamente. Pilares se elevam acima da parede brilhante de gás, resistindo a essa radiação. O “vapor” que parece subir das “montanhas” celestes é, na verdade, gás ionizado quente e poeira quente saindo da nebulosa devido a implacável radiação. O JWST também revela estrelas individuais que estavam previamente escondidas por outros detectores. Devido à sensibilidade à luz infravermelha, o JWST pode olhar através da poeira cósmica para ver esses objetos.

4.4 Nebulosa do Anel Sul

A Nebulosa do Anel Sul (catalogada como NGC 3132) é uma nebulosa planetária - neste caso, uma enorme nuvem de gás com meio ano-luz de diâmetro em torno de uma estrela moribunda - e relativamente próxima em escala cósmica, a apenas 2.000 anos-luz de distância. Ao observar a nebulosa em comprimentos de onda do infravermelho médio, o JWST revelou a segunda estrela empoeirada no centro da nebulosa com muito mais detalhes. A estrela orbita de perto sua companheira enquanto ejeta periodicamente

camadas de gás e poeira (ver Figura 7).

Esta cena foi criada por uma estrela anã branca – os restos finais de uma estrela como o nosso Sol quando pára de queimar combustível através da fusão nuclear. Na imagem da NIRC*am*, a anã branca aparece no canto inferior esquerdo da estrela central brilhante, parcialmente escondida por um pico de difração. A mesma estrela aparece – mas mais brilhante, maior e mais vermelha – na imagem do MIRI. Esta anã branca está envolta em espessas camadas de poeira, que a fazem parecer maior. A estrela mais brilhante orbita de perto a anã branca mais escura, ajudando a distribuir o que é ejetado.

As imagens parecem muito diferentes porque a NIRC*am* e o MIRI coletam diferentes comprimentos de onda de luz. A NIRC*am* observa a luz infravermelha próxima, que está mais próxima dos comprimentos de onda visíveis que nossos olhos detectam. O MIRI vai mais longe no infravermelho, captando comprimentos de onda do infravermelho médio. A segunda estrela aparece mais claramente na imagem do MIRI, porque este instrumento pode ver a poeira brilhante ao seu redor. A física explica o motivo da diferença na resolução dessas imagens. A NIRC*am* oferece imagens de alta resolução porque esses comprimentos de onda de luz são mais curtos. O MIRI fornece imagens de resolução média porque seus comprimentos de onda são maiores – quanto maior o comprimento de onda, mais grosseiras são as imagens. Mas ambos fornecem uma quantidade incrível de detalhes, nunca antes observados.

[images/gallery](#).

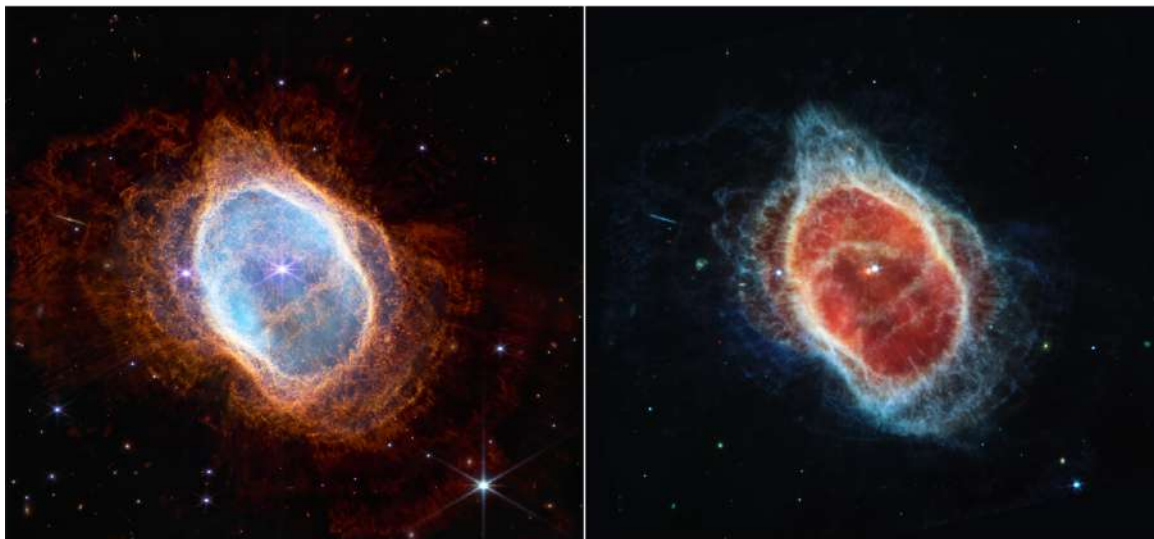


Figura 7: Esta comparação lado a lado mostra observações da Nebulosa do Anel Sul em luz infravermelha próxima, à esquerda, e luz infravermelha média, à direita. Créditos: NASA, ESA, CSA, and STScI.

4.5 Quinteto de Stephan

Por fim, completando o quadro destas primeiras descobertas, o JWST revelou a fantástica imagem e de alta resolução de um grupo conhecido como *Stephan's Quintet*, um agrupamento de galáxias que parecem dançar uma em torno da outra. Raramente vimos com tantos detalhes como as galáxias em interação desencadeiam a formação de estrelas e como o gás nessas galáxias está sendo perturbado. Como anunciado pelo JWST, o Quinteto de Stephan é um fantástico “laboratório” para estudar esses processos fundamentais. A imagem também mostra ejeções por um buraco negro supermassivo em uma das galáxias com riqueza de detalhes. Grupos de galáxias como esse podem ter sido mais comuns no início do Universo, quando material superaquecido e em queda pode ter alimentado buracos negros muito energéticos chamados quasares. Ainda hoje, a galáxia mais alta do grupo – NGC 7319 – abriga um núcleo galáctico ativo, um buraco negro supermassivo com 24 milhões de vezes a massa do Sol.

Este grupamento de cinco galáxias, é mais conhecido por ser destaque no filme clássico de férias, *“It's a Wonderful Life”* (A Felicidade Não Se Compra), de 1946. Segundo a NASA, este enorme agrupamento é a maior imagem do JWST até o momento, cobrindo cerca de um quinto do diâmetro da Lua. Ele contém mais de 150 milhões de píxeis e é construído a partir de quase 1.000 arquivos de imagem separados. As informações do JWST fornecem novos *insights* sobre como as

interações galácticas podem ter impulsionado a evolução das galáxias no início do Universo. Estudar galáxias relativamente próximas como essas ajuda os cientistas a entenderem melhor as estruturas vistas em um Universo muito mais distante. Com sua poderosa visão infravermelha e resolução espacial extremamente alta, o JWST mostra detalhes neste grupo de galáxias. Aglomerados de milhões de estrelas jovens e regiões estelares de novos nascimentos de estrelas enfeitam a imagem. Caudas de gás, poeira e estrelas estão sendo puxadas de várias galáxias devido a interações gravitacionais. Com o JWST, chegamos em um nível de detalhes que era impossível de se obter até agora.

5 O que esperar?

As imagens que as agências espaciais revelaram em 12 de julho são apenas o começo. Os cientistas se inscreveram para usar o telescópio por meio de um processo competitivo, e o primeiro ano de observações já está agendado. É bem provável que o JWST mude nossa perspectiva sobre alguns aspectos do Universo nos próximos meses e anos. Nas palavras do administrador da NASA, Bill Nelson: “Essas imagens, incluindo a visão mais profunda do nosso Universo que já foi tirada, nos mostram como o James Webb ajudará a descobrir as respostas para perguntas que ainda nem sabemos fazer; perguntas que nos ajudarão a entender melhor nosso Universo e o lugar

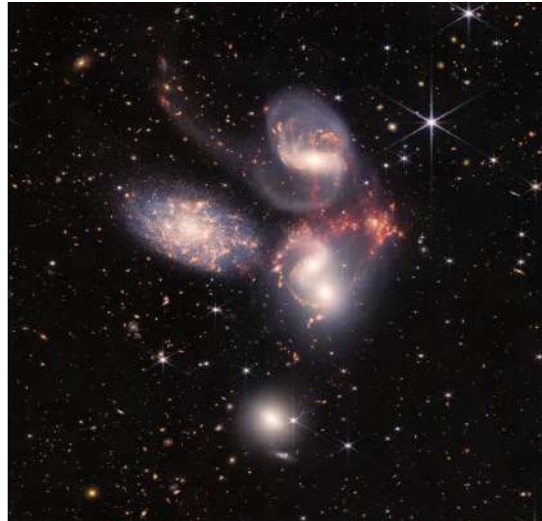


Figura 8: Juntas, as cinco galáxias do Quinteto de Stephan também são conhecidas como Hickson Compact Group 92 (HCG 92). Embora seja chamado de “quinteto”, apenas quatro das galáxias estão realmente próximas umas das outras e envolvidas em uma dança cósmica. A quinta galáxia mais à esquerda, chamada NGC 7320, está bem em primeiro plano em comparação com as outras quatro. NGC 7320 reside a 40 milhões de anos-luz da Terra, enquanto as outras quatro galáxias (NGC 7317, NGC 7318A, NGC 7318B e NGC 7319) estão a cerca de 290 milhões de anos-luz de distância. Créditos: NASA, ESA, CSA, e STScI.

da humanidade dentro dele”.

De fato, estamos vivendo uma nova era das astronomia e as observações desses primeiros dias da história do Universo lançará luz sobre questões desconcertantes sobre matéria, vida, energia escura, buracos negros, evolução das galáxia, como eram as primeiras estrelas e como chegamos ao Universo que conhecemos hoje.

6 Sessão agradecimentos

O autor agradece o convite do Prof. Júlio Fabris para redigir este artigo de divulgação e a Prof.^a Rita C. dos Anjos pela leitura criteriosa. Também agradeço ao CNPq (311758/2021–5) pelo suporte financeiro. Todas as imagens e informações técnicas sobre o JWST foram fornecidas pela NASA, ESA, CSA, e STScI (<https://webb.nasa.gov/>).

Sobre o autor

Jaziel Goulart Coelho (jaziel.coelho@ufes.br) possui Graduação em Física pela Universidade Federal de Viçosa (2007), Mestrado em Física pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA (2009) na investigação de Estrelas de Nêutrons e Quarks. Realizou o Doutorado no ITA (2013)

na investigação de pulsares e magnetares e Pós-Doutorado em Astrofísica na Università degli Studi di Roma La Sapienza, Itália e na Divisão de Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. É membro do Observatório Cherenkov Telescope Array - CTA. Atualmente é professor Adjunto do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e membro permanente do Programa de Doutorado Internacional em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação (PPGCosmo-UFES), além de membro Docente do Programa de Pós-Graduação em Astrofísica do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). É pesquisador nas área de astrofísica relativística, gravitação, objetos compactos, ondas gravitacionais e astrofísica multimessageira.

Referências

- [1] H. Atek et al., *Revealing Galaxy Candidates out to $z \sim 16$ with JWST Observations of the Lensing Cluster SMACS0723* (2022). [ArXiv:2207.12338](https://arxiv.org/abs/2207.12338).
- [2] S. L. Finkelstein et al., *A Long Time Ago in a Galaxy Far, Far Away: A Candidate $z \sim 14$ Galaxy in Early JWST CEERS Imaging* (2022). [ArXiv:2207.12474](https://arxiv.org/abs/2207.12474).

Perturbações seculares nas órbitas de Júpiter e Saturno

Luís Pedro Orosz

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

A atração gravitacional mútua entre os planetas do sistema solar provocam alterações nas suas orbitas que seriam perfeitamente elípticas se os planetas estivessem sujeitos somente sob a ação gravitacional do Sol. Essas alterações nas orbitas podem ser de períodos relativamente curtos (alguns anos) ao final dos quais os planetas voltam ao seu estado anterior. Podem também ter um efeito cumulativo alterando pouco a pouco as orbitas ao longo de anos ou séculos seguidos modificando completamente a órbita original ou retornando ao estado inicial depois de vários séculos. Essas são as mais interessantes de se analisar e são chamadas de perturbações seculares. Nesse texto se analisa o caso mais aparente desse fenômeno é a interação gravitacional entre Júpiter e Saturno. Alterações significativas foram detectadas pelo astrônomo Halley em 1695, e naquela época nenhuma justificativa razoável à luz da lei da gravitação universal foi encontrada, chegando a se duvidar da validade dessa lei. O problema foi solucionado quase 100 anos depois por Laplace. Esse texto é uma análise do artigo de Laplace *Mémoire sur les inégalités séculaires des planètes et des satellites*, de 1787, e seus desdobramentos posteriores.

Abstract

The mutual gravitational attraction between the planets of the Solar System causes changes in their orbits that would be perfectly elliptical if the planets were subject only to the gravitational action of the Sun. These changes in orbits can be relatively short periods (a few years) at the end of which the planets return to their previous state. They can also have a cumulative effect by gradually changing orbits over years or centuries in a row, completely modifying the original orbit, or returning to the initial state after several centuries. These are the most interesting to analyze and are called Secular Disturbances. This text analyzes the most apparent case of this phenomenon: the gravitational interaction between Jupiter and Saturn. Significant alterations were detected by the astronomer Halley in 1695, and at that time no reasonable justification in light of the law of universal gravitation was found, leading to doubts on the validity of this law. The problem was solved almost 100 years later by Laplace. This text is an analysis of Laplace's article *Mémoire sur les inégalités séculaires des planètes et des satellites*, from 1787, and its later developments.

Palavras-chave: Laplace, mecânica celeste, órbitas.

Keywords: Laplace, celestial mechanics, orbits.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38486](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38486)

1 Introdução

O movimento irregular dos planetas em contraste com o movimento circular das estrelas, desde a antiguidade sempre causou estranheza nos observadores do céu. A escola de Platão considerava o movimento circular como sendo perfeito e entendia que os movimentos irregulares dos planetas seriam aparentes e que de algum modo deveriam ser explicados através de movimentos circulares. Apollonius e Ptolomeu através da chamada teoria dos epiciclos deram uma explicação nessa linha de pensamento. Os movimentos seriam obtidos através de uma série de movimentos circulares concatenados um com os ou-

tros: um círculo circulando sobre outro. Apesar da complexidade, essa linha de pensamento perdurou até o século XVII, com aproximações cada vez mais precisas. Ptolomeu usou também esse procedimento na sua obra *Almagesto*, com sucesso. Outro fato a destacar é a descoberta através desse processo de uma família interessante de novas curvas: algumas algébricas (polinomiais) e outras transcendentais (não polinomiais). Descobertas interessantes para os matemáticos [1]. O passo seguinte nesse contexto foi a descoberta do movimento elíptico dos planetas e outros invariantes, as chamadas leis de Kepler. Estas deram uma visão bem simples dos movimentos planetá-

rios. Vale destacar que Kepler chegou nas suas conhecidas leis através da interpretação de dados astronômicos catalogados pelo astrônomo Tycho Brahe durante 20 anos. O próprio Kepler analisou e concluiu suas leis depois de 25 anos de estudo.

A obra de Newton com a lei da gravitação universal, sem dúvida uma das maiores descobertas da ciência em todos os tempos, completou praticamente o ciclo de conhecimento dessa questão, uma vez que explicava e deduzia as leis de Kepler de um modo preciso e rigoroso. Teoria e experimentos andando juntos e de acordo. Sua obra *Principia* foi publicada em 1687. A publicação dessa obra entretanto teve um desenrolar dramático até a sua versão final. Newton submeteu o seu trabalho à Royal Society and Cambridge University Press para publicação e sua solicitação foi recusada. Após sete anos, período o qual Newton se dedicou a outras atividades irrelevantes, o astrônomo Halley, tomando conhecimento da importância do trabalho de Newton, se empenhou para que o mesmo fosse publicado. Newton teve que refazer todo trabalho e teve dificuldade para isso. Depois de dezoito meses de trabalho incessante surge finalmente a obra *Principia*. Porém a história ainda não termina aí. Halley teve que empenhar uma soma razoável em dinheiro para cobrir um possível fracasso na publicação.

Teoria e experimentos caminhado juntos como já registrei. Não demorou muito, entretanto para surgir problemas: a lei dos quadrados inversos das distâncias funcionava bem num problema de dois corpos (Sol e planeta). Quando porém se considerou a questão envolvendo três ou mais corpos problemas surgiram. O mais famoso deles se relacionava com os planetas Júpiter e Saturno. Esse problema ficou conhecido como o problema das variações seculares de Júpiter e Saturno.

O problema surgiu a partir de observações de dados astronômicos feitas pelo astrônomo Halley em 1695. Ele observou o seguinte: Júpiter ao longo dos séculos apresenta uma aceleração no seu movimento ao redor do Sol fazendo com que sua órbita se espirale em direção ao Sol. Ao mesmo tempo Saturno apresenta nas mesmas condições uma desaceleração no seu movimento fazendo com que sua órbita se afaste do Sol. A permanecerem essas tendências era de se esperar que Júpiter acabasse sendo projetado no Sol e Saturno escapando do sistema solar. Observo que

se tal fenômeno ocorresse seriam necessários vários séculos ou milênios para se concretizar mas era o que indicava as observações preliminares.

Como explicar esses comportamentos à luz da lei de gravitação? Halley apresentou esse problema para o próprio Newton, que tentou sem sucesso dar uma explicação de natureza geométrica, sem sucesso. Euler e Lagrange tentaram de forma independente solucionar o problema com conclusões contraditórias entre si e insatisfatórias. O próprio Newton chegou admitir que a sua lei da gravitação universal tinha exceções. A questão foi finalmente resolvida por Laplace.

O artigo intitulado *Mémoire Sur les Inégalités Séculaires des Planètes et. Des Satellites*, publicado em 1787 [2], cem anos após a publicação do *Principia* de Newton, explicava de forma rigorosa que o fenômeno era de fato uma consequência da lei da gravitação universal de Newton, comprovando portanto a sua validade universal. Nesse contexto a destacar o seguinte: a ação gravitacional mútua entre os planetas produzem perturbações em suas órbitas elípticas. Algumas dessas perturbações são periódicas, de períodos relativamente curtos e os planetas voltam as suas órbitas originais após alguns anos.

Outras perturbações gravitacionais entretanto são cumulativas. As órbitas sofrem pequenas alterações com o passar dos anos. Essas alterações se somam ao longo dos anos e dos séculos. Elas podem alterar completamente a órbita de um planeta ao ponto do planeta ser projetado no Sol escapar do sistema solar ou ainda chocar com outro planeta. Laplace entretanto mostra que na maioria dos casos ou pelo menos nos casos em que as frequências de dois planetas são incomensuráveis o que sucede é que essas perturbações são periódicas; de períodos que duram séculos; ao final dos quais as órbitas voltam a sua posição original. Daí é que vem a denominação “perturbações seculares dos planetas e satélites”.

A natureza e relevância histórica desse problema despertou meu interesse em estudar o citado artigo de Laplace. O texto presente é uma análise desse artigo e seus desdobramentos posteriores.

2 Considerações preliminares de Laplace

As seguintes observações foram fundamentais para direcionar o trabalho do autor.

1. Os planetas e seus satélites mantêm a mesma distância média ao Sol principalmente, quando as suas interações mutuas são incomensuráveis (isto é a relação entre suas frequências não é dada por números inteiros).
2. Se considerarmos um período longo a soma das massas dos planetas dividido pelos eixos principais de suas órbitas permanecem constante. Isso pode indicar que a aceleração de um planeta deve ser compensada pela desaceleração de um outro.
3. O movimento de Júpiter e Saturno são próximos de comensuráveis na proporção de 2 para 5. A aceleração de Júpiter ao longo dos anos seria $6^{\circ} 9'$ e a desaceleração de Saturno $16^{\circ} 7'$.
4. Comparações feitas em longos intervalos apresentam uma diminuição da velocidade de Júpiter e um aumento da velocidade de Saturno. Destaco aqui que estudos desse fenômeno baseado em observações realizadas ao longo de poucos séculos induziram a conclusões erradas. Ou seja para se ter uma real dimensão do fenômeno muito séculos de observações são necessários.

Laplace então relata o seguinte.

“Ao fazer a aproximação dos movimentos de Júpiter e Saturno até a terceira potência incluindo excentricidade e inclinação das órbitas não encontrei qualquer alteração significativa. Entretanto é impossível não reconhecer essas alterações nas medições feitas na prática.”¹

Ou seja, a teoria não está se ajustando com a prática. Alguns estudiosos a partir desse dado concluíram equivocadamente que as referidas alterações não teriam relação com a gravitação.

A partir desse conjunto de observações Laplace conjectura que: Por trás dessas variações observadas deve haver uma Perturbação Secular Periódica, que justifiquem essas aparentes discrepâncias. As órbitas em questão sofrem um longo período de perturbações mas devem retornar as condições iniciais ao final desse período como a análise ao longo de muitos séculos estariam indicando. A hipótese do planeta Júpiter se projetar no Sol ou a de Saturno escapar do Sistema Solar

¹Tradução livre do autor.

a princípio deveria ser descartada. A explicação a ser dada seria através de Lei da Gravitação aumentando a potencia do grau na solução aproximada.

Nas palavras de Laplace:

“ A probabilidade dessas considerações serem a causa do fenômeno em questão me motivaram a empreender um longo e penoso cálculo (a partir das equações diferenciais correspondentes), necessário para confirmar minha conjectura.”²

As equações diferenciais são aquelas obtidas a partir da lei dos quadrados inverso das distâncias. Laplace faz uso de fatos oriundos dessa lei como por exemplo as leis de Kepler.

Em outras palavras o caminho seria, partindo das equações diferenciais dos movimentos de Júpiter e Saturno no sistema de três corpos (Sol, Júpiter e Saturno), adequar a teoria com os resultados práticos. Os cálculos desenvolvidos pelo autor (usando as suas próprias palavras) são extensivos e penosos. Não tem como detalhá-los aqui. Creio que um projeto interessante fosse envolver uma equipe de bons alunos de cálculo para conferir os mesmos, incluindo também observações práticas para tornar o processo menos árido, mas bastante interessante.

3 Sobre as equações dos movimentos de Júpiter e Saturno

Laplace estabelece 6 equações diferenciais: 3 para o movimento de Júpiter, 3 para o movimento de Saturno, fazendo uso da lei dos quadrados inversos de Newton.

Cada equação se refere a componente da força na direção de um dos eixos coordenados x, y, z preestabelecidos, de modo que o Sol fica fixo no sistema de coordenadas. O Sol com massa unitária. Para resultados gerais aplicados a qualquer planeta ou satélites são usadas as letras m e m' , para massa de cada planeta ou satélite envolvido. No caso específico de Júpiter e Saturno o valor de m e m' serão respectivamente: $1/1067$ e $1/3358$.

Tendo em mãos essas equações e na impossibilidade de apresentar uma solução exata o caminho é obter informações sobre a solução (propriedades), comparando com os dados experimentais, fazendo tentativas e ajustes. É nisso tudo que

²Tradução livre do autor.

está a habilidade do autor. Para o leitor do texto é impossível diante de tantas manipulações de fórmulas entender o porquê de tudo aqui, o que só fica claro no final daquela etapa.

A estratégia empregada entretanto é clara: como a massa do Sol é muito maior do que a dos planetas o movimento elíptico é predominante, sendo afetado com o passar dos anos pelas interações entre planetas. A partir daí e através de algumas simulações a busca é por invariantes ou seja propriedades da órbita elíptica que não se alteram e por propriedades que são de fato afetadas e seus efeitos. Não menos importante é obter uma solução aproximada dos movimentos.

4 Resultados

O eixo maior da elipse não sofre perturbações periódicas seculares relevantes: ele oscila levemente em torno de um valor médio. É, portanto, um invariante importante.

O vetor que liga o centro do sol ao centro da elipse é chamado de vetor de Laplace. Esse vetor não é um invariante. Ele executa movimentos periódicos leves e também movimentos seculares. Essa é uma descoberta importante. As variações seculares desse vetor são pequenas mas cumulativas. Elas alteram a excentricidade de elipse, uma vez que o eixo maior se mantém constante. Com isso a órbita se aproxima de um círculo quando a excentricidade aumenta e se torna mais achatada quando a excentricidade diminui. A análise que Laplace faz das perturbações seculares em geral se baseia essencialmente nesses dois resultados ou seja que o vetor de Laplace tem variação aparente e cumulativa enquanto o eixo maior da elipse permanece quase fixo. Seria interessante registrar mas não disponho do valor máximo e mínimo da excentricidade de cada planeta para se ter uma ideia da suas variações ocasionadas pela interação entre eles. Esse resultado válido em geral para planetas e satélites é conhecido hoje como teorema de Laplace. Tem algumas outras consequências aparentes e interessantes; uma delas é a seguinte: o movimento do vetor de Laplace no caso da nossa Terra pode, segundo V. I. Arnold, ser um dos fatores responsáveis pela Era do Gelo [3]. Essa hipótese se fundamenta na coincidência do período de duração dos dois fenômenos e no seguinte argumento: quando a excentricidade da órbita da Terra aumenta, o tempo que

a Terra permanece próxima ao Sol diminui, enquanto que o tempo que fica distante aumenta em função da Lei das Áreas de Kepler, de modo que o clima se torna mais frio. A grandeza desse efeito é calculada com precisão. Seria igualmente interessante mas não disponho dos valores máximos e mínimos da excentricidade da Terra e da Lua.

Continuando a análise de Júpiter e Saturno, Laplace determina o período de perturbação gravitacional entre esses dois planetas como sendo 877 anos valor depois ajustado para 929 anos. Ele faz uso constante de resultados oriundos da Lei de Gravitacão. Ao final desse período os planetas voltam a posição inicial. Segundo os cálculos e observações registradas em vários datas diferentes a aceleração de Júpiter e desaceleração de Saturno atingiu o auge por volta de 1580. A partir desse ano começou o processo inverso.

A considerar aqui o seguinte o movimento diário de Júpiter e Saturno ao redor do sol é aproximadamente 299 e 120,5 segundos de arco respectivamente. Esses valores são próximos de comensuráveis ou seja: o valor $2w(1) - 5w(2)$, onde $w(1)$ e $w(2)$ são as frequências dos respectivos planetas é próxima de zero e muito pequeno em relação a $w(1)$ e $w(2)$. Esse fator no desenvolvimento em série da solução aparece no denominador complicando a análise e limitando a validade da solução a um intervalo de tempo finito. Esse é o fator responsável pelas pequenas mas cumulativas perturbações que duram séculos.

No caso de frequências comensuráveis um denominador do tipo anterior se anula induzindo a séries divergentes, impedindo qualquer informação sobre o movimento. Caso interessante comentado no artigo se refere a três satélites de Júpiter: o movimento da primeiro é cerca de duas vezes o do segundo que por sua vez duas vezes o do terceiro. Essa razão próxima de dois tem como consequência a quase impossibilidade de haver uma eclipse simultânea dos três planetas. Baseado nas tabelas disponíveis na época seriam necessários 1.317.900 anos para que isso ocorresse. Como as equações diferenciais dos movimentos de Júpiter e Saturno não permitem uma solução exata, a solução aproximada conseguida através de ajustes e comprovações realizadas com rigor (no caso o autor fala em 24 medições em situações convenientes), a solução tem um intervalo de validade finita: 1.200 para futuro e 1.000 para passado.

Hoje com o auxílio do computador rapidamente se prevê os movimentos em intervalos da ordem de 10.000 anos. O computador é bom para prever resultados, mas para analisar o movimento para um intervalo ilimitado na direção do futuro ou do passado ele não fornece resposta. Para esse fim pesquisas de natureza qualitativa das órbitas foram desenvolvidas, para responder perguntas, por exemplo do tipo: em tal situação específica a órbita é fechada? Resultados profundos foram conseguidos por nomes como: Kolmogorov, Arnold e Moser.

Laplace aproveita ainda todo o desenvolvimento efetuado para tratar do problema Júpiter-Saturno para solucionar um outro problema do gênero envolvendo agora o sistema Lua-Sol-Terra. Aqui é interessante reproduzir as palavras do próprio Laplace:

“Permanecia ainda um outro fenômeno celeste: a aceleração média da Lua que não pudemos até então reduzir às leis da gravidade. Os astrônomos que trataram desse problema concluíram que essa aceleração não poderia ser oriunda da gravitação. Para explicá-la recorreram a várias hipóteses, como resistência do Éter, transmissão sucessiva da gravidade, ação dos cometas, etc. Depois de várias tentativas, finalmente consegui descobrir a verdadeira causa desse fenômeno. Descobri que a equação secular da Lua resulta da ação do Sol sobre o satélite, combinada com a variação da excentricidade da órbita da Terra. É periódica e depende dos mesmos argumentos que o quadrado desta excentricidade. Quando a excentricidade diminui como tem ocorrido constantemente desde as observações mais antigas o movimento médio da Lua aumenta e diminui no caso contrário. Esta teoria concorda exatamente com as observações mais antigas e assim completa a universalidade da Lei de Gravitação da qual todos os fenômenos celestes contribuem sem exceção para mostrar a verdade”.³

Interessante como era o pensamento na época em que a existência de um éter fazia parte dos conceitos da física.

³Tradução livre do autor.

5 Conclusão final

Laplace foi quem introduziu o termo “mecânica celeste”. O seu trabalho nessa área culminou com a sua monumental obra *Traite de mécanique céleste*, publicada em 5 volumes entre 1799 e 1825. As pesquisas de Laplace foram retomadas anos depois por Poincaré. Ele desenvolveu uma série de outros métodos para calcular as perturbações nos movimentos de corpos celestes. Esses métodos estão registrados na sua obra *Les Méthodes nouvelles de la mécanique céleste*.

A registrar aqui também que esses novos métodos continuam a se confrontar com séries divergentes e as soluções continuam valendo num intervalo de tempo limitado, e como referi acima métodos qualitativos foram posteriormente desenvolvidos [3, 4]. Interessante a destacar que as considerações geométricas de Newton para explicar as alterações nos movimentos de Júpiter e Saturno são usadas para estudar esses métodos. Laplace entendeu seus resultados como uma confirmação da lei de gravitação universal de Newton. Hoje em dia ninguém duvida disso.

Suas descobertas também levaram-no ainda a concluir que o sistema solar é estável. Entretanto os anos seguintes vieram mostrar que essa questão é bem mais delicada e aparentemente ainda em aberto.

Agradecimentos

A Sandra Mara Adami, secretária do CCE/UFES pela cuidadosa digitalização do texto. A Elizabete Grigorio e a equipe de trabalho da Biblioteca da UFES, pelo competente trabalho de localizar e disponibilizar para mim o artigo de Laplace de 1787. A Júlio C. Fabris, do Departamento de Física da UFES, por comentários e sugestões.

Sobre o autor

Luiz Pedro Orosz (lp.orosz.vix@gmail.com) é professor Associado do Departamento de Matemática da Universidade Federal do Espírito Santo desde 1975. Sua formação acadêmica inclui Licenciatura em Matemática pela Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Rio Claro (SP) em 1972, Mestrado em Matemática pelo Instituto de Matemática Pura e Aplicada (RJ) em 1975 e

Doutorado em Matemática pela Rice University (EUA) em 1982.

de l'Académie Royale des Sciences de Paris 49–92 (1787).

Referências

- [1] R. Tarnas, *A epopéia do pensamento ocidental* (Bertrand Brasil, 1999).
- [2] P. S. Laplace, *Mémoire sur les inégalités séculaires des planètes et des satellites*, Mémoires

- [3] V. I. Arnold, *Mathematical methods of classical mechanics* (Springer, Nova York, 1978).
- [4] J. Stillwell, *Mathematics and its history* (Springer, Nova York, 2010), 3^a ed.

Um primeiro passo em direção à modificação da gravidade: teorias escalar-tensoriais e $f(R)$

Pedro Bessa e Túlio Ottoni

Programa de Pós-Graduação em Cosmologia, Gravitação e Astrofísica - PPGCosmo

Resumo

A relatividade geral, apesar de seus sucessos, é hoje entendida como uma teoria aberta a possibilidades de modificação. Neste artigo buscamos introduzir de maneira didática a base de uma classe de teorias que busca preencher algumas lacunas deixadas pela relatividade geral, as teorias $f(R)$ e escalar-tensoriais. Construímos as teorias a partir de um princípio de ação e obtemos suas equações de campo. Mostramos a equivalência entre as duas teorias e comentamos sobre mecanismos de blindagem. Por fim, mostramos alguns resultados observacionais sobre modificações da relatividade geral dentro do contexto dessas teorias.

Abstract

Today, after its triumphs, general relativity is considered a theory with viable modifications. In this review, we introduce in a pedagogical way the fundamentals of a class of theories that try to fill the gaps left by general relativity, the class of $f(R)$ and scalar-tensor theories. We build the theories from the action principle and obtain their field equations. We also show the equivalence between the two theories and comment on the screening mechanism. At the end, we show some observational results on modifications of general relativity with these types of theory on mind.

Palavras-chave: Gravidade Modificada, Astrofísica, cosmologia.

Keywords: Modified Gravity, Astrophysics, Cosmology.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.37208](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.37208)

1 Introdução

A relatividade geral, ao lado da mecânica quântica e sua extensão natural, a teoria quântica de campos, forma a base da física moderna. Sua descrição e previsões em problemas específicos da interação gravitacional desde distâncias da ordem de unidades astronômicas (1 u.a. $\approx 1,5 \times 10^8$ km) até gigaparsecs (1 Gpc $\approx 3,1 \times 10^{19}$ km), assim como de potenciais gravitacionais desde $\phi \sim GM/c^2 r \sim 10^{-5}$ até $\phi/c^2 \sim 0,3$ a estabelece firmemente como uma das teorias científicas mais bem sucedidas [1–3]. Uma introdução a sua matemática e física pode ser encontrada facilmente no primeiro volume destes Cadernos de Astronomia [4, 5].

Entretanto, com seus mais de 100 anos, se a teoria se mostra repetidamente testada e comprovada, sabemos hoje que ela é, pelo menos, incompleta. Essa incompletude pode ser resumida em dois fatos consumados que a física do século XX estabeleceu:

- A natureza fundamental das interações é quântica. Se desejamos acessar os regimes de pequenas distâncias ou de altíssimas energias da interação gravitacional, precisamos encontrar uma formulação devidamente quântica da mesma. A relatividade geral não pode ser essa formulação [6, 7], e logo ela deve ser o limite clássico de alguma outra teoria de gravitação quântica [8]
- O Universo está expandindo aceleradamente [9]. O mecanismo por trás dessa aceleração não é conhecido, mas a sua observação garante que a relatividade geral, sozinha, não descreve completamente a evolução do Universo – ao menos a adição de uma constante cosmológica Λ é necessária se queremos descrever a gravitação nas escalas relevantes para a cosmologia [10, 11].

Dado que a relatividade geral (RG) não pode ser a teoria final da gravitação, é fundamental explorar outras teorias da interação gravitacional.

Essa exploração precisa sempre levar em conta que a RG é consolidada em um espectro de regimes de energia e distância [10–12], e por isso qualquer alternativa à RG precisa contê-la nos regimes em que ela é consolidada.

Um bom princípio para guiar-se na busca por teorias físicas é o da parcimônia: ao tentar estender uma teoria, começamos por adicionar ou modificar apenas o mínimo possível, de forma a não adicionar elementos demais à teoria já estabelecida, e acabar por perder tanto a semelhança com a teoria consolidada, quanto o controle sobre a teoria modificada. Tendo em vista esse princípio, podemos pensar na mais fundamental das modificações de uma teoria: a adição de um grau de liberdade. Em teorias de campo clássicas (ou quânticas) como a relatividade geral ou o eletromagnetismo maxwelliano, isso se traduz em um campo escalar [13].

A ideia deste artigo é dar uma visão geral sobre as modificações da relatividade geral que possuem esse grau de liberdade a mais: um campo escalar. Veremos também uma classe de teorias, as teorias $f(R)$, que podem ser entendidas como teorias que adicionam um grau de liberdade escalar a mais na RG.

É instrutivo estudar esse tipo de teoria não apenas por serem teorias relativamente simples em sua construção, mas porque mesmo esse tipo prototípico de modificação de gravidade já apresenta uma rica complexidade que nos permite entender melhor a dificuldade de se ir além da relatividade geral [10]. Além disso, essas teorias são algumas das mais estudadas no cenário de gravitação, e apresentam uma vasta literatura que data ao menos da década de 60 do século passado [14, 15].

Ilustramos aqui esses tipos de teoria da seguinte forma: Primeiro, enunciamos a estrutura básica das teorias, assim como suas principais características. Depois, mostramos sua equivalência, ao mesmo tempo que definimos quantidades relevantes para testar as teorias. Por fim, mostramos de forma resumida formas de testar essas teorias no cenário astrofísico e cosmológico, e como elas estão restringidas em relação à RG.

Usamos no decorrer do texto, a convenção $\hbar = c = 1$, exceto quando explicitamente notado.

2 Teorias escalar-tensoriais

A mais simples generalização da relatividade geral, consiste na inclusão de um campo escalar no fenômeno gravitacional. Dessa forma, a gravidade seria descrita pela métrica usual do espaço-tempo, representada por um tensor, e por um campo escalar fundamental. Dizemos que essa generalização é simples pois um campo escalar é a entidade física mais simples que existe, uma vez que é um invariante de Lorentz [16].

Um campo escalar no setor gravitacional surge por exemplo no contexto de teorias do tipo Kaluza-Klein e teorias de cordas, ao considerarmos dimensões superiores [17].

Historicamente, a ideia de um campo escalar atuando no setor gravitacional foi primeiramente motivada por Paul Dirac (1902-1984) e sua hipótese dos números grandes. Dirac, tentando buscar uma explicação para os valores de constantes da natureza, introduziu a ideia de que constantes adimensionais não devem ser puros números matemáticos que aparecem nas leis fundamentais da física, mas sim variáveis que caracterizam o estado atual do universo [18].

A constante física que aparece na interação gravitacional é a constante newtoniana G . Na ação de Einstein-Hilbert, ela aparece como um parâmetro livre, cujo valor é medido experimentalmente

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} R + S^{(m)}[g_{\mu\nu}, \Psi], \\ &= \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{R}{\kappa} + L_m \right), \end{aligned} \quad (1)$$

sendo $\kappa = 16\pi G$ e L_m a densidade lagrangiana dos campos de matéria, denotados coletivamente por Ψ . Ao integrarmos esse termo com o elemento de volume invariante $\sqrt{-g}d^4x$ temos a ação da matéria $S^{(m)}[g_{\mu\nu}, \Psi]$.

Na forma como está escrita, a ação (1) respeita o princípio da equivalência Fraco, uma vez que os campos de matéria se acoplam minimamente com a geometria, por meio de $\sqrt{-g}$, de forma que o movimento das partículas será descrito por uma geodésica da métrica. Ou seja, partículas teste irão seguir o menor caminho na geometria curva do espaço-tempo.

Podemos então explorar a ideia de Dirac e promover κ a um campo escalar dinâmico, que pode possuir uma dependência espaço-temporal $\kappa \rightarrow \kappa(\vec{x}, t)$. Se então definirmos nosso campo es-

calar como sendo $\phi \equiv 1/\kappa$, a ação da teoria passa a ser

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} (\phi R + L_m). \quad (2)$$

Temos agora uma ação que representa uma teoria bem distinta da relatividade geral, onde os efeitos novos surgem do primeiro termo ϕR , conhecido como acoplamento não-mínimo. Tal termo representa um novo grau de liberdade da teoria, no caso um grau de liberdade escalar.

Para tornar o campo escalar um campo dinâmico, precisamos adicionar novos termos à lagrangiana. Para nossas equações de movimento serem de segunda ordem, livres de instabilidade [19], os termos devem conter somente funções do campo e de sua derivada primeira $L_\phi = L(\phi, \nabla_\mu \phi)$. Incluímos então primeiramente um termo cinético

$$L_\phi = -\frac{\omega}{\phi} g^{\mu\nu} \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi, \quad (3)$$

onde ω é uma constante e dividimos pelo próprio campo para não termos nenhuma constante com dimensão na teoria, conforme a ideia original de Dirac.

Sendo assim, a ação da teoria fica sendo

$$S = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\phi R - \frac{\omega}{\phi} g^{\mu\nu} \nabla_\mu \phi \nabla_\nu \phi + L_m \right). \quad (4)$$

Vemos que agora o campo ϕ se acopla diretamente com a geometria, e como a gravidade se acopla com todos os fenômenos físicos, ϕ deve entrar nessa universalidade de alguma forma.

Segundo o princípio da equivalência, localmente a relatividade restrita é válida, o que significa que matematicamente devemos fazer a substituição $g^{\mu\nu} \rightarrow \eta^{\mu\nu}$, $\nabla_\mu \rightarrow \partial_\mu$. O termo cinético do campo escalar, no contexto da relatividade restrita, se reduz à forma usual $L_\phi \approx \eta^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi$. Assim, dizemos que o termo cinético se acopla minimamente com a métrica, somente através de $\sqrt{-g} g^{\mu\nu}$.

Já o termo que contém o produto ϕR não pode ser obtido dessa forma, pois no limite da Relatividade Restrita ele simplesmente não existe, pois $R = 0$, uma vez que o espaço-tempo de Minkowski não possui curvatura. Essa é portanto a origem do nome acoplamento não-mínimo.

A teoria descrita pela ação (4) é conhecida como teoria de Brans-Dicke [14] e possui ω como único parâmetro livre. Atualmente essa é uma

teoria escalar-tensorial protótipo, com grande relevância histórica e que serve como base para desdobramentos mais modernos.

A ação mais geral de uma classe de teorias escalar-tensorial com um acoplamento não-mínimo de um único campo escalar com a geometria, que generaliza a ação de Brans-Dicke (4), pode ser escrita como

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} \left(F(\Phi) R - \frac{Z(\Phi)}{2} \nabla_\mu \Phi \nabla^\mu \Phi - V(\Phi) \right) + S^m [e^{2a(\Phi)} g_{\mu\nu}, \Psi_m], \quad (5)$$

onde permitimos que os fatores que multiplicam o escalar de curvatura R e o termo cinético sejam funções genéricas $F(\Phi)$ e $Z(\Phi)$ do campo. Adicionamos também um possível termo potencial $V(\Phi)$ na dinâmica do campo escalar e também permitimos um acoplamento direto com a matéria através do termo $e^{2a(\Phi)} g_{\mu\nu}$.

A ação (5) leva em conta a ideia de variar a constante gravitacional, na medida que podemos interpretar $G_{eff} = G/F(\Phi)$ como um novo acoplamento gravitacional, não mais constante, mas dependente do campo Φ , que por sua vez varia no espaço e no tempo. O termo potencial $V(\Phi)$ indica que existe uma auto-interação do campo.

Uma análise direta da ação tensor-escalar geral (5) nos levaria a pensar que a teoria possui 4 funções livres $F(\Phi)$, $Z(\Phi)$, $V(\Phi)$ e $a(\Phi)$. Porém esse não é o caso. Temos duas liberdades de transformação, expressas por uma transformação conforme da métrica e pela redefinição do campo escalar

$$g_{\mu\nu} \rightarrow \Omega^2(\Phi) g_{\mu\nu}, \quad (6)$$

$$\Phi \rightarrow f(\Phi), \quad (7)$$

de forma que podemos eliminar duas das quatro funções livres. Ao fazermos isso, a ação permanece invariante.¹ Quando escolhemos uma definição do campo e uma transformação específica da métrica, no fundo o que estamos escolhendo é uma representação da teoria e experimentos não

¹Ao fazermos a transformação conforme 31 na métrica, seu determinante muda como [20] $g \rightarrow \Omega^2(\Phi)g$ e o escalar de Ricci $R \rightarrow \Omega^{-2}(\Phi)(R - 6g^{\mu\nu} \nabla_\mu \nabla_\nu \log \Omega(\Phi) - 6g^{\mu\nu} (\nabla_\mu \log \Omega(\Phi)) \nabla_\nu \log \Omega(\Phi))$. A ação permanece invariante na medida que podemos englobar os termos com o fator conforme $\Omega^2(\Phi)$ e suas derivadas nas funções arbitrárias $F(\Phi)$, $Z(\Phi)$, $V(\Phi)$ e $a(\Phi)$.

são sensíveis à representação, sendo portanto, puramente uma convenção [21]. A seguir exploramos duas representações mais usadas.

2.1 Representação de Jordan

Na representação de Jordan, escolhamos $a = 0$ e $Z = 1$ e a ação assume a forma

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} \left(F(\Phi)R - \frac{1}{2} \nabla_\mu \Phi \nabla^\mu \Phi - V(\Phi) \right) + S^m[g_{\mu\nu}, \Psi_m], \quad (8)$$

onde o acoplamento não-mínimo com a geometria é determinado pela função $F(\Phi)$.

Como a parte da ação que descreve a matéria é a mesma da relatividade geral, concluímos que $\nabla^\mu T_{\mu\nu} = 0$, e partículas irão seguir geodésicas da métrica $g_{\mu\nu}$, em acordo com o princípio da equivalência de Einstein.

2.2 Representação de Einstein

Para obtermos a representação de Einstein, fazemos $F = 1$ e $Z = 1$, usando a invariância da ação (5) por transformações conformes da métrica. A ação nessa representação pode ser escrita como

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} \left(R - \frac{1}{2} \nabla_\mu \Phi \nabla^\mu \Phi - V(\Phi) \right) + S^m[e^{2a(\Phi)} g_{\mu\nu}, \Psi_m]. \quad (9)$$

Vemos que na ação da representação de Einstein, temos o termo usual da relatividade geral com o escalar de Ricci, e o campo escalar agora está minimamente acoplado com a geometria através dos termos cinético e potencial. Porém aparece um acoplamento direto com a matéria, a partir da nova métrica que depende do campo escalar. Transferimos assim o acoplamento direto, não-mínimo, com a geometria, para um acoplamento direto com a matéria.

Como alteramos a parte da ação que descreve a matéria, partículas não irão mais seguir geodésicas da nova métrica. Apesar de parecer uma violação do princípio da equivalência, a representação de Einstein é fisicamente equivalente à representação de Jordan, onde só estamos usando variáveis diferentes para representar os observáveis. Assim, o movimento descrito por partículas será o mesmo nos dois casos, porém só será uma

geodésica da métrica de Jordan, que muitos autores chamam de métrica física. Essa equivalência entre as representações é motivo de debate. Para mais detalhes ver [21] e as referências citadas.

Para definirmos uma notação que evidencia o intercambiamento entre as duas representações, vamos chamar a métrica na representação de Einstein de $g_{\mu\nu}^*$ e todas as quantidades calculadas a partir dela serão denotadas com *. Além disso, denotamos o campo escalar nessa representação por φ e o potencial por $U(\varphi)$.

De fato, existe uma transformação particular que leva a ação de Jordan (8) na ação de Einstein (9), onde simplesmente particularizamos a classe de transformações (6) e (7) na forma

$$g_{\mu\nu}^* \equiv F(\Phi)g_{\mu\nu}, \quad (10)$$

$$\left(\frac{d\varphi}{d\Phi} \right)^2 \equiv \frac{3}{4F(\Phi)^2} \left(\frac{dF(\Phi)}{d\Phi} \right)^2 + \frac{1}{4F(\Phi)}. \quad (11)$$

Agora, reescrevemos a ação usando as novas definições e o conhecido resultado de que a derivada covariante coincide com a derivada usual para campos escalares. Assim,

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g^*} \left(R^* - \frac{1}{2} g_{\mu\nu}^* \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi - U(\varphi) \right) + S^m[g_{\mu\nu}^*/F(\Phi(\varphi)), \Psi_m], \quad (12)$$

onde $U(\varphi) \equiv V(\Phi)F^{-2}(\Phi)/4$.

As equações de campo, derivadas da ação (12), assumem uma forma matemática mais simples, própria para um tratamento numérico, dada por

$$R_{\mu\nu}^* - \frac{1}{2} R^* g_{\mu\nu}^* - 2\partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi + g_{\mu\nu}^* g_{\alpha\beta}^* \partial_\beta \varphi \partial_\alpha \varphi = 8\pi G T_{\mu\nu}^* - 2U(\varphi)g_{\mu\nu}^*, \quad (13)$$

$$\square^* \varphi = -4\pi G \alpha(\varphi) T^* + \frac{dV(\varphi)}{d\varphi}, \quad (14)$$

onde

$$\alpha(\varphi) \equiv -\frac{1}{2} \frac{d \ln F(\Phi(\varphi))}{d\varphi}. \quad (15)$$

Como na representação de Einstein temos um acoplamento direto com a matéria, ao mantermos a definição do Tensor Energia-Momento como sendo $T_{\mu\nu}^* \equiv -(2/\sqrt{-g^*})\delta S^{(m)}/\delta g_{\mu\nu}^*$ temos que a equação de movimento não terá a mesma forma, uma vez que $T_{\mu\nu}^* = F^{-3}T_{\mu\nu}$.

Vemos, assim, que o que falta agora é especificar a forma do acoplamento $F(\phi(\varphi))$ e a forma do potencial $V(\varphi)$, para escolhermos uma teoria, dentro dessa classe geral de teorias escalar-tensorial. Usualmente temos essas duas avenidas para explorar a física dessas teorias.

2.3 Um exemplo de teoria escalar-tensorial

Como exemplo simples de teoria, podemos considerar uma ação sem potencial $V(\varphi) = 0$. Fisicamente isso significa que o campo não possui auto-interação. Pela equação (14) vemos que um termo quadrático no potencial irá funcionar como a massa do campo escalar. Dessa forma estamos tratando um campo não massivo, que irá mediar uma interação de longo alcance.

Para a função de acoplamento, podemos escolher

$$F(\Phi) = 1 - 8\pi\xi\Phi^2 \quad (16)$$

onde $\xi \in \mathfrak{R}$. As motivações para essa forma do acoplamento vão de considerações fundamentais, que surgem, por exemplo, da quantização de campos clássicos em espaços curvos [22], até cenários cosmológicos com modelos de inflação [23, 24].

Como veremos a seguir, do ponto de vista experimental, vínculos são colocados ao expandirmos a função de acoplamento em torno de um valor de fundo do campo escalar. Podemos então considerar um modelo para a função de acoplamento, já no frame de Einstein, dado por

$$F(\varphi) = \left[\cosh(2\sqrt{3}\xi\varphi) \right]^{-1/(3\xi)}, \quad (17)$$

$$\alpha(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{3}} \tanh(2\sqrt{3}\xi\varphi). \quad (18)$$

A função dessa forma tem como motivação uma aproximação analítica do acoplamento não-mínimo (16) já na representação de Einstein [25]. Essa aproximação pode ser vista na Figura 1.

Podemos vincular a teoria, com o acoplamento na forma (16), por meio de experimentos feitos no sistema solar. Para isso consideramos o chamado formalismo pós-newtoniano parametrizado (PPN) [1] que consiste em expandir o campo gravitacional (a métrica $g_{\mu\nu}$) em torno do valor newtoniano (a métrica de Minkowski $\eta = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$). Tal aproximação vale para baixas velocidade e campos fracos.

De forma análoga, podemos fazer uma expansão do campo escalar, em torno de um valor de

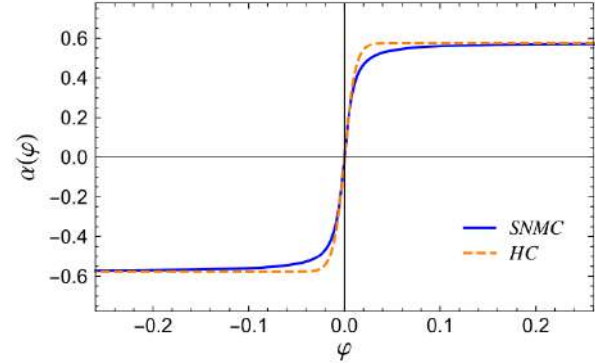


Figura 1: Comparação entre o acoplamento não-mínimo (SNMC) e o modelo com funções hiperbólicas (HC), ambos na representação de Einstein para $\xi = 25$. O modelo hiperbólico reproduz o comportamento do acoplamento não-mínimo, aumentando a concordância a medida que $|\varphi|$ aumenta. Figura retirado do artigo de um dos autores [26].

fundo, que denotamos por φ_∞ . Assim o acoplamento pode ser escrito como

$$F(\varphi) = F(\varphi_\infty) + (dF/d\varphi)_{\varphi_\infty}(\varphi - \varphi_\infty) + O[(\varphi - \varphi_\infty)^2]. \quad (19)$$

Os parâmetros γ e β , chamados parâmetros de Eddington, são os mais importantes, se tratando de experimentos realizados no sistema solar. O primeiro mede o quanto de curvatura é produzido em uma distância r por uma massa M , já o segundo mede o desvio da linearidade na lei de superposição gravitacional. No contexto da relatividade geral eles são identicamente iguais a 1, i. e., $\gamma = \beta = 1$. Na classe de teorias escalar-tensorial que estamos tratando eles assumem a forma [27]

$$1 - \gamma = 2 \frac{\alpha^2}{1 + \alpha^2} = \frac{(dF/d\Phi)^2}{F/2 + 2(dF/d\Phi)^2}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} 1 - \beta &= -\frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{(1 + \alpha^2)^2} \frac{d\alpha}{d\varphi} \\ &= -\frac{1}{4} \frac{F(dF/d\Phi)}{F + 3(dF/d\Phi)^2} \frac{d\gamma}{d\Phi}, \end{aligned} \quad (21)$$

onde α , F e suas derivadas são avaliadas em $\varphi = \varphi_\infty$.

O parâmetro γ foi medido através do atraso de Shapiro feito pela nave Cassini [28], e possui um valor $1 - \gamma \lesssim 2,3 \times 10^{-5}$. Já o parâmetro β é medido através de observações do avanço do periélio de Mercúrio [29] e possui um vínculo de

$1 - \beta \lesssim 8 \times 10^{-5}$. Considerando o vínculo da Casini em γ e usando a expressão do acoplamento do modelo hiperbólico (18), vemos que vínculo se manifesta como $|\xi\varphi_\infty| < 0,0017$, ou seja, o valor assintótico do campo deve ser pequeno, se tornando menor à medida que $|\xi|$ aumenta.

3 Teorias $f(R)$

Weyl, em 1918, na tentativa de formular uma teoria unificada da gravitação com o eletromagnetismo, postulou que um termo quadrático no lugar de R na ação de Einsein-Hilbert poderia dar conta da interação eletromagnética dentro de seu formalismo [15]. Nas décadas de 60 e 70, à medida que a questão da renormalizabilidade de uma teoria tornou-se importante para a física de campos e partículas, tornou-se importante encontrar uma extensão renormalizável da relatividade geral, que dependesse apenas de escalares de curvatura [8]. Entre outras, no fim da década de 70, uma extensão da relatividade geral com R^2 na ação, proposta por Starobinsky mostrou-se capaz de reproduzir, sem a inclusão de um novo campo escalar, as mesmas previsões da inflação, um paradigma moderno da cosmologia que encontrava-se em sua inepção [30].

Historicamente postuladas para resolver questões de regimes de altas energias, após a descoberta da aceleração da expansão do Universo, teorias $f(R)$ foram redescobertas como modelos prototípicos de modificações geométricas da relatividade geral para dar conta da fase de expansão acelerada do Universo sem a necessidade de invocar uma nova interação fundamental (como um campo escalar), ou uma componente exótica de energia (como uma energia escura). A ideia básica consiste em substituir o escalar de Ricci na ação (1) por uma função, a princípio arbitrária, $f(R)$:

$$\sqrt{-g}Rd^4x \longrightarrow \sqrt{-g}f(R)d^4x. \quad (22)$$

A arbitrariedade da função $f(R)$ torna esse tipo de teoria particularmente conveniente para testar hipóteses sobre a estrutura do setor gravitacional para além da relatividade geral. É possível tanto construir *toy models* para entender como termos de ordem maior no escalar de curvatura ajudam a construir uma teoria renormalizável (teorias de ordem maior em R); para

acelerar a expansão do Universo (teorias cosmicamente viáveis); como limites a baixas energias de teorias de gravidade quântica (teorias efetivas); e também como modelos do Universo primordial (a inflação de Starobinsky).

A necessidade de que as teorias reproduzam a relatividade geral nos regimes já conhecido, entretanto, impõe restrições à função f [31]. Não apenas isso, mas o fato de que nossas equações de movimento não devem possuir mais de duas derivadas na variável dinâmica, que no caso são a métrica e o campo escalar essas variáveis, ou possuir os chamados campos "fantasma", também limita a forma de f [19]. Por fim, como cada teoria é em geral construída de forma a entender algum regime particular de energia, teorias que buscam explicar a aceleração cósmica precisam reproduzir o Universo observado [32], e teorias que buscam ser o limite de uma teoria quântica da gravidade [33] possuem cada uma complexidades e limitações particulares.

Como veremos adiante, a dinâmica obtida da variação da lagrangiana de teorias $f(R)$ possui uma equivalência com certos tipos de teorias escalar-tensoriais. Essa conexão nos permite reinterpretar a teoria também como uma teoria com um grau de liberdade a mais do que a relatividade geral, e um potencial efetivo V_{eff} , da forma heurística

$$\frac{df}{dR} \longleftrightarrow \phi \quad (23)$$

$$R\phi - f(R) \longleftrightarrow V_{\text{eff}}(\phi). \quad (24)$$

Esse tipo de equivalência é importante, novamente, para limitar também a forma da função f . Para além das restrições já discutidas, potenciais efetivos são uma maneira de entender como a teoria retorna ao limite da relatividade geral nos regimes já conhecidos.

Antes de explorarmos da melhor forma possível que uma introdução nos permite a enorme complexidade e vastidão de teorias desse tipo, uma última nota é importante: Não existe apenas uma forma de variar a ação de uma teoria gravitacional. Aqui trabalharemos com o formalismo métrico, onde tratamos a métrica como única variável dinâmica da nossa teoria. No formalismo métrico-afim, por exemplo, tratamos a conexão Γ como variável completamente independente de g ; enquanto que no formalismo de Palatini, assumimos que a conexão é independente e ademais que

os campos de matéria também não dependem da conexão. Em ambos os casos, nas ações do tipo $f(R)$, os diferentes formalismos levam a teorias distintas do formalismo métrico. Por brevidade e necessidade de introdução, nos restringiremos a esse tipo de formalismo. O leitor interessado pode checar as limitações, especificidades e possibilidades dentro do formalismo de Palatini, por exemplo, nas referências [10, 31]

3.1 Equações de campo

Com a substituição (23) na ação de Einstein-Hilbert, temos a ação

$$\mathcal{S} = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} f(R). \quad (25)$$

Para obter as equações da teoria no formalismo métrico, variamos (25) em relação a $g_{\mu\nu}$:

$$\frac{\delta \mathcal{S}}{\delta g_{\mu\nu}} = 0,$$

e obtemos as equações de campo, onde incluímos uma fonte de matéria na variação, dando o tensor energia-momento,

$$f'(R)R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}f(R)g_{\mu\nu} - [\nabla_\mu \nabla_\nu - g_{\mu\nu} \square] f'(R) = 8\pi GT_{\mu\nu}, \quad (26)$$

$$f'(R)R - 2f(R) + 3\square f'(R) = 8\pi GT, \quad (27)$$

onde a última equação é a equação do traço.

Essa é a forma geral das equações de campo para uma teoria $f(R)$ arbitrária.

3.2 Um exemplo de teoria $f(R)$

Como exemplo, considere a ação de uma teoria $f(R)$ com a função do escalar de Ricci escolhida por

$$f(R) = R - m^2 \frac{c_1(R/m^2)^n}{c_2(R/m^2)^n + 1}, \quad n > 0. \quad (28)$$

c_1 , c_2 e n são parâmetros livres do modelo, e m é uma escala de massa característica, comumente associada à densidade média de matéria no Universo.

Note que no limite de alta curvatura ($R \rightarrow \infty$), $f(R) = R - m^2 \frac{c_1}{c_2}$, retornamos à ação da relatividade geral com constante cosmológica $\Lambda = \frac{m^2 c_1}{2 c_2}$, e no limite de baixa curvatura ($R \rightarrow 0$), resgatamos a relatividade geral $f(R) = R$. Esse modelo

é conhecido como o modelo de Hu-Sawicki [34], e essas características são comuns a modelos de teoria $f(R)$ que buscam explicar a aceleração da expansão cósmica.

3.2.1 Outro exemplo de teoria $f(R)$

Uma teoria que possui a forma da ação relativamente simples, com uma função exponencial no escalar de curvatura é a considerada por Linder [35], com a função $f(R)$ dada por

$$f(R) = R - \alpha\beta(1 - \exp(-R/\alpha)). \quad (29)$$

Esse modelo, chamado de *exponencial*, possui características assintóticas semelhantes ao modelo de Hu-Sawicki, visto que sua proposta se inclui na de modelar a aceleração cósmica, logo necessitando se encaixar nas restrições de teorias $f(R)$ cosmologicamente viáveis.

4 Equivalência entre teorias e blindagem

Nesse capítulo vamos definir a constante $\kappa \equiv 8\pi G$. Considere a ação de uma teoria $f(R)$ genérica, que se acopla minimamente aos campos de matéria (ou seja, a única interação entre matéria e curvatura é a universal, dada pelo princípio da equivalência):

$$\mathcal{S} = \int d^4x \sqrt{-g} \frac{f(R)}{2\kappa} + \mathcal{S}_m[g_{\mu\nu}, \Psi]. \quad (30)$$

A dinâmica da ação total \mathcal{S} não possui interação entre os campos de matéria Ψ e o campo gravitacional \mathbf{g} , por construção [36]. A independência dinâmica entre campo gravitacional e matéria deve permanecer verdadeira independente do sistema de coordenadas que usamos, em particular, isso deve ser verdadeiro por uma mudança de coordenadas conforme; isto é, uma mudança de coordenadas como em (6) que transforma a métrica como

$$g_{\mu\nu} \rightarrow g'_{\mu\nu} = \Omega^2(x^\mu) g_{\mu\nu}, \quad (31)$$

Ω um função arbitrária das coordenadas espaço-temporais.

Essa discussão se torna interessante por conta do seguinte procedimento [37], que mostra a equivalência dinâmica entre teorias escalar-tensoriais e teorias $f(R)$.

A partir da ação (30), defina um campo escalar auxiliar $\chi(R)$, função explícita de R , a princípio

arbitrário. Considere agora a seguinte ação:

$$\mathcal{S} = \frac{1}{2\kappa} \int d^4x \sqrt{-g} \left[f(\chi) + \frac{df(\chi)}{d\chi} (R - \chi) \right]. \quad (32)$$

Integrando por partes o segundo termo da densidade lagrangeana, obtemos

$$\mathcal{S} = \frac{1}{2\kappa} \int d^4x \sqrt{-g} \left[f(\chi) + f(\chi) \left(\frac{dR}{d\chi} - 1 \right) \right]. \quad (33)$$

Não é difícil mostrar que variar esta ação em relação a $\delta\chi$ é equivalente a variar a ação (30) em relação à mesma variável. Isto prova que as ações são dinamicamente equivalentes. A extremização nos dá a equação de vínculo

$$\frac{d^2 f}{d\chi^2} (R - \chi) = 0, \quad (34)$$

que é válida se e somente se $d^2 f/dR^2 = 0$ ou $(R - \chi) = 0$. Não é desejável (mas não impossível)² que nossa teoria possua $d^2 f/dR^2 = 0$, por motivos que se esclarecerão logo em seguida; por isso, chegamos à igualdade

$$\chi = R.$$

Isso prova que podemos reparametrizar nossa teoria em termos de uma função escalar, que teremos as mesmas equações de movimento (equivalência dinâmica). Agora simplesmente definimos as duas funções

$$\phi \equiv \frac{df}{d\chi} \quad (35)$$

$$V(\phi) \equiv \chi(\phi)\phi - f(\chi(\phi)), \quad (36)$$

obtemos uma ação idêntica a (4), com a constante $\omega = 0$:

$$\mathcal{S} = \frac{1}{2\kappa} \int d^4x \sqrt{-g} [\phi R - V(\phi)] + \mathcal{S}_m[g_{\mu\nu}, \Psi]. \quad (37)$$

Com isso concluímos a prova da equivalência entre teorias $f(R)$ no formalismo métrico e teorias de Brans-Dicke com $\omega = 0$.

Note que, se $f''(R) = 0$, não poderíamos ter realizado a mudança de variáveis $f'(R) \rightarrow \phi$. O fato de que obtemos a mesma ação, com a mesma quantidade de graus de liberdade, e logo a mesmas equações de movimento, apenas redefinindo

²De fato, a condição matemática suficiente para que possamos realizar esse procedimento é que df/dR seja uma função injetiva e C^0 [31].

parâmetros, mostra o poder do formalismo lagrangiano.

Com a equivalência dinâmica das duas teorias estabelecida, podemos explorar ainda a liberdade de transformações de coordenadas de (30), para explicitar certas propriedades físicas da teoria $f(R)$. Considere a transformação (31), definida, como em (6) por

$$g_{\mu\nu} \rightarrow \tilde{g}_{\mu\nu} \equiv f'(R)g_{\mu\nu} = \phi g_{\mu\nu}, \quad (38)$$

e a redefinição do campo escalar, a menos de uma constante,

$$d\tilde{\phi} = \sqrt{\frac{3}{2\kappa}} \frac{d\phi}{\phi}. \quad (39)$$

Essas transformações, que não modificam a dinâmica da teoria (invariante por mudança de coordenadas), colocam a ação (37) na forma

$$\begin{aligned} \mathcal{S}' = \frac{1}{2\kappa} \int d^4x \sqrt{-\tilde{g}} \left[\tilde{R} - \frac{1}{2} \partial_\alpha \partial^\alpha \tilde{\phi} - U(\tilde{\phi}) \right] \\ + \mathcal{S}_m[e^{\sqrt{2\kappa/3}\tilde{\phi}} g_{\mu\nu}, \Psi], \quad (40) \end{aligned}$$

onde

$$\phi \equiv f'(R) = e^{\sqrt{\frac{2\kappa}{3}}\tilde{\phi}} \quad (41)$$

$$U(\tilde{\phi}) = \frac{Rf'(R) - f(R)}{2\kappa(f'(R))^2}. \quad (42)$$

Esta ação é idêntica a (12), o que mostra também a possibilidade de entender a teoria como uma teoria de Brans-Dicke na representação de Einstein. De fato, a equivalência entre as duas teorias (e também as teorias $f(R)$ no formalismo de Palatini) é tal que as propriedades matemáticas de uma podem ser imediatamente estendidas à outra, como, por exemplo, a existência de singularidades e a propriedades de espaço-tempos [31, 38].

4.1 Blindagem

Por generalidade, ou falta de criatividade, o campo ϕ definido na seção anterior é comumente chamado de *scalaron*. Entender o comportamento de uma teoria transformando para a forma de uma teoria escalar-tensorial é por vezes útil na hora de estudar os efeitos da modificação da gravidade uma vez que podemos escrever esses efeitos em termos da equação de movimento e do potencial da partícula escalar – o *scalaron* nesse caso.

Considere a equação do traço (26). Ao escrever a ação de uma teoria $f(R)$ na forma (37), a equação do traço se torna

$$\square\phi + \frac{dV_{\text{eff}}(\phi)}{d\phi} = \frac{\kappa}{3}T, \quad (43)$$

$$\frac{dV_{\text{eff}}}{d\phi} \equiv \frac{2}{3}V(\phi) - \frac{\phi}{3}\frac{dV}{d\phi}, \quad (44)$$

que é muito semelhante à segunda equação (12), com a forma de uma equação de Klein-Gordon com um potencial.

Essa forma de escrever a equação de campo, aparentemente uma simples redefinição de variáveis, na verdade mostra exatamente a ideia que discutimos: podemos entender a dinâmica da modificação na ação pela função $f(R)$ como a dinâmica de um campo escalar ϕ sujeito a um potencial V_{eff} – que pode ser interpretada como a dinâmica de uma partícula escalar relativística.

Esse fato não é apenas uma mera reinterpretção da teoria. De fato, à equação de Klein Gordon geral

$$\square\phi + \frac{\partial V}{\partial\phi} = 0 \quad (45)$$

podemos atribuir uma massa efetiva m_{eff} , que é função de V e T , para colocá-la na forma de uma equação de Klein-Gordon para uma partícula massiva

$$\square\phi + \mu^2\phi = 0, \quad (46)$$

quando temos $|\phi|/\kappa \ll 1$, também chamado de limite de campo fraco, podemos expandir V_{eff} em uma série de Taylor, que nos permite escrever a importante relação

$$m_{\text{eff}}^2 = \frac{\partial^2 V_{\text{eff}}}{\partial\phi^2}. \quad (47)$$

O fato de que o *scalaron* ganha uma massa efetiva, que é função das densidades de matéria T e da curvatura R é o que gera o chamado mecanismo de blindagem.

No vácuo, ou seja, quando $T = R = 0$, o *scalaron* possui uma massa $m^2 \propto \mathcal{O}(\Lambda)$ [12] da ordem da constante cosmológica, que faz com que a teoria tenha o comportamento da relatividade geral mais uma constante cosmológica.

A função de Green da equação (46) nos fornece uma interação da forma

$$\mathcal{G}(|r|) = \frac{A}{r} e^{-\alpha m_{\text{eff}} r}, \quad (48)$$

A e α constantes; $r \equiv |x - x'|$ a distância entre duas partículas pontuais interagindo, e $m_{\text{eff}} = \mu$, em unidades geométricas. Em termos de interações de campos, isso significa que a distância característica da interação, dada pelo comprimento de onda Compton do *scalaron*, é

$$\lambda \propto \frac{1}{m_{\text{eff}}}.$$

Essa interação, por vezes chamada de quinta força, não é detectada nos regimes em que a relatividade geral é bem testada, e é necessário que $m_{\text{eff}} \rightarrow \infty$, já que a interação não pode ter alcance algum nesses regimes. Isso nos leva a uma conclusão importante: nos limites em que já testamos a relatividade geral, podemos colocar restrições na massa efetiva do campo escalar, que vamos chamar apenas de m . Em particular, como m depende da modificação da gravidade, isto é, da forma do potencial (43), esse potencial na ação (9) não pode ser arbitrário. Como já provamos a equivalência entre as teorias, isso também restringe a forma da função $f(R)$.

Esse tipo de mecanismo, onde a massa do potencial escalar se torna uma função da densidade de energia-momento do espaço tempo, é conhecido como mecanismo *chameleon*, e foi estudado pela primeira vez no contexto das teorias aqui discutidas por Khoury e Weltman [39, 40]. Outros tipos de mecanismo de blindagem são possíveis, mas sua construção é mais delicada [41], ou envolve, por exemplo, a exigência de que o bóson responsável pela interação gravitacional seja massivo [42].

Podemos resumir a ideia por trás desse mecanismo de blindagem da interação de um campo escalar da seguinte maneira:

1. Campos escalares conseguem alterar a interação gravitacional em grandes escalas, que equivalem a baixas densidades em cosmologia.
2. A interação gravitacional deve, na escala do Sistema Solar, de altas densidades, obedecer à relatividade geral.
3. Podemos conciliar esses dois regimes assumindo que o campo escalar possui uma massa efetiva m_{eff} , dependente da densidade de matéria.

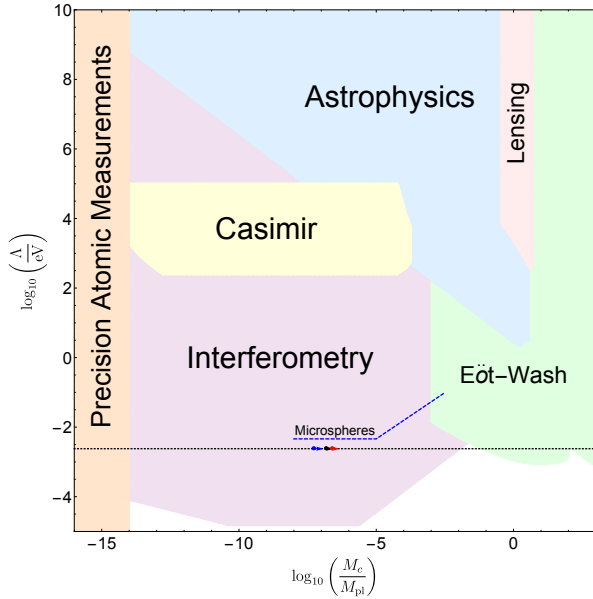


Figura 2: Regiões do espaço de parâmetro do *scalaron* em excluídas por testes em laboratório e astrofísicos. Partes do gráfico coloridas não são permitidas para partículas escalares com escala de energia característica Λ/MeV e massa efetiva M/M_{pl} excluam Retirado de [43]

- Essa dependência do contraste de densidade possui uma escala de interação $\lambda \approx 1/m_{\text{eff}}$. Podemos restringir a massa efetiva do campo escalar testando a gravitação em regiões de diferentes densidades.

Na Figura 2 estão ilustradas algumas regiões do espaço de parâmetros massa efetiva M/M_{pl} escala da energia Λ/MeV para o tipo de teoria dada por (28), com $n = 1$.

5 Testes cosmológicos e astrofísicos

De maneira bastante resumida, podemos dividir os testes de teorias de gravitação em dois pares de regimes: o regime de background (ou de fundo) e o regime perturbativo; e os testes com distâncias astrofísicas e distâncias cosmológicas. Testes de teorias da interação gravitacional datam ao menos do século 17 [44], com a gravitação universal e sua lei do inverso do quadrado da distância.

Como estamos dando enfoque a teorias escalar-tensoriais e $f(R)$ revisaremos brevemente alguns resultados observacionais obtidos, nos regimes que a tecnologia atual nos permitiu acessar, sobre essas teorias. Referências padrão para modificações da gravidade, no estado da arte da época,

são, por exemplo [10, 11, 43]. Aqui, escolhemos três modos de testar essas teorias de gravitação: a física de pulsares de sistemas binários, o crescimento de estruturas no Universo, e a radiação cósmica de fundo.

5.1 Testes astrofísicos

Como teste astrofísico de teorias escalar-tensoriais, podemos considerar a física de pulsares em sistemas binários. Para uma revisão de estrelas de nêutrons ver o artigo publicada na edição passada desse periódico [45]. Estrelas de nêutrons são objetos compactos com campo gravitacional intenso $\phi/c^2 \sim 0.3$, produzindo um ambiente de alta curvatura onde a teoria escalar-tensorial pode ser testada.

A dinâmica de um sistema binário é descrita pelos parâmetros keplerianos clássicos: o período orbital P_b , projeção do semi-eixo maior da órbita $x = a \sin i$, excentricidade e , longitude do periastro ω e a época de passagem do periastro T_0 . Na projeção do semi-eixo x , temos que a é o tamanho do eixo maior da elipse e i é o ângulo entre o plano orbital e o plano do céu, definido através de nossa linha de visão.

Porém como as estrelas de nêutrons são objetos relativísticos, a órbita do sistema não será descrita somente pelos parâmetros keplerianos. Podemos incluir os efeitos relativísticos por meio dos parâmetros pós-keplerianos, que permitem dentre outras coisas, a variação dos parâmetros clássicos. Os principais parâmetros pós-keplerianos são: \dot{P}_b variação do período orbital, $\dot{\omega}$ avanço do periastro, γ fator relativístico que aparece no atraso de Einstein, além de r e s , relacionados ao atraso de Shapiro. Para detalhes desse formalismo ver [46, 47]

Teorias como a descrita pelo acoplamento não-mínimo (16), são conhecidas por modificar a estrutura de objetos compactos, como estrelas de nêutrons, pelo fenômeno da escalarização espontânea. Tal efeito consiste na ativação do campo escalar na presença da matéria da estrela. O campo assim entra como fonte de energia, e logo contribui para a massa da estrela, alterando suas propriedades globais.

Como exemplo de vínculo astrofísico, podemos considerar a teoria escalar-tensorial mais simples que apresenta a escalarização espontânea. Tal teoria é conhecida como Damour-Esposito-Farèse

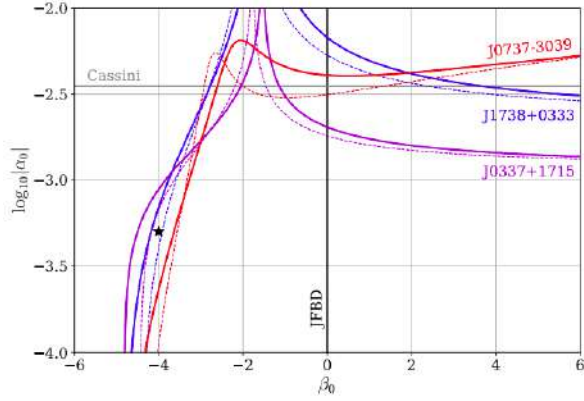


Figura 3: Vínculo no espaço de parâmetros da teoria DEF devido a experimentos como o atraso de Shapiro medido pela nave Cassini e cronometragem de pulsares. Os valores permitidos para os parâmetros, que satisfazem os vínculos são aqueles abaixo das curvas. A teoria de brans dicke corresponde a linha vertical $\beta_0 = 0$. Retirado de [50]

(DEF) [48] e é caracterizada pelo acoplamento

$$F(\varphi) = e^{\xi\varphi^2}, \quad (49)$$

$$\alpha(\varphi) = -\xi\varphi. \quad (50)$$

Nessa teoria, o acoplamento entre o campo escalar e a matéria é descrito pela função $\alpha(\varphi)$. A teoria protótipo de Brans-Dicke é descrita por um acoplamento constante, independente do campo. Experimentos no regime pós-newtoniano e de cronometragem de pulsares, testam a estrutura perturbativa em ordem mais baixa do acoplamento. Assim, podemos expandir as funções em torno do valor cosmológico de fundo φ_∞ , como no formalismo PPN, e a teoria passa a depender efetivamente de dois parâmetros

$$\alpha_0 \equiv \alpha(\varphi_\infty) \quad (51)$$

$$\beta_0 \equiv \beta(\varphi_\infty), \quad (52)$$

onde $\beta = \partial\alpha(\varphi)/\partial\varphi$.

Essa teoria passou recentemente por um teste extremamente forte da cronometragem do pulsar duplo, sistema único para testes gravitacionais [49,50]. O resultado está ilustrado na Figura 3. Vemos que o teste com pulsares é de fato bem forte, restringindo o espaço de parâmetros e limitando o aparecimento da escalarização espontânea, de forma que a teoria vinculada se assemelha bastante à relatividade geral.

5.2 Testes Cosmológicos

5.2.1 Background

Podemos dividir os observáveis cosmológicos em nível de background e nível perturbativo. No regime de background, estudamos os observáveis relacionados ao Universo em média e nas maiores escalas: a densidade média de energia, a curvatura média e a distribuição de matéria média, por exemplo. Ambos os regimes lidam com escalas de curvatura de $R = H^2 \approx 10^3$ km/s/Mpc, energias ordens de magnitudes inferiores ao regime de buracos negros e objetos compactos, como listados em 4. Nessas escalas, a relatividade geral nos diz que a dinâmica do Universo é muito bem descrita pelas duas equações de Friedmann [51],

$$H^2 = \frac{\kappa\rho}{3} + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^2}, \quad (53)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa}{6}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}. \quad (54)$$

Encontramos, é claro, a constante cosmológica aqui. No regime do background, as teorias que buscam substituir essa constante podem ser entendidas como possuindo uma densidade e pressão efetivas ρ_{eff} , p_{eff} , que são funções de $f(R)$ (ou, de maneira equivalente, do campo escalar e seu potencial) a partir da solução das equações de campo 30, e logo uma equação de estado efetivo $\omega_{\text{eff}} = p_{\text{eff}}/\rho_{\text{eff}}$, de tal maneira que podemos escrever as equações de Friedmann modificadas como

$$H^2 = \frac{\kappa(\rho + \rho_{\text{eff}})}{3} + \frac{\Lambda}{3} - \frac{K}{a^2}, \quad (55)$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{\kappa}{6}[(\rho + \rho_{\text{eff}}) + 3(p + p_{\text{eff}})] + \frac{\Lambda}{3}. \quad (56)$$

A grande busca observacional da cosmologia nesse regime é determinar os parâmetros cosmológicos de matéria, curvatura e energia escura hoje,

$$\Omega_{i0} = \frac{\kappa\rho_i}{3H_0^2}.$$

A cosmologia observacional consegue restringir modelos a partir da observação da expansão do Universo e de seus diversos componentes energéticos, e o fato de que a constante cosmológica possui uma equação de estado constante $\omega = -1$ é capaz de restringir fortemente teorias que possuam um ω_{eff} variável, como as escalar tensoriais. A Figura 4 mostra resultados sobre ω_{eff} obtidos a partir de dados do satélite WMAP, que observou a radiação cósmica de fundo, as compilações de

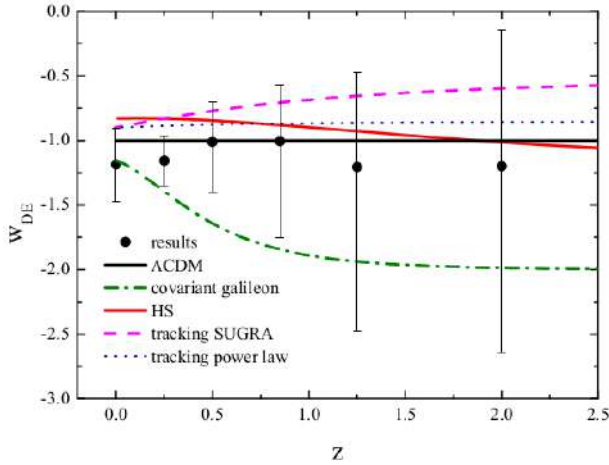


Figura 4: Comportamento de ω_{eff} para diferentes modelos de gravidade modificada. A linha vermelha corresponde ao ω_{eff} para o modelo 28. A linha preta constante é o modelo padrão da cosmologia; retirado de [52].

observação de supernovas Union, e dados sobre as oscilações acústicas bariônicas [52].

5.2.2 Perturbações

No regime perturbativo, buscamos entender o comportamento da interação gravitacional em estruturas de escalas da ordem de aglomerados de galáxias (ordem de Gpc) ou menores – aí já entrando no chamado regime não-linear, que não comentaremos aqui. Os Cadernos de Astronomia possuem uma excelente introdução à formação de estruturas cosmológicas e o regime perturbativo no artigo [53].

A ideia desse regime é estudar a formação de estruturas de matéria no Universo, para além da média total, visto que se o Universo fosse completamente homogêneo e isotrópico, como o modelo padrão assume nas maiores escalas, e como descrevem as equações (53), obtidas a partir da chamada métrica de Robertson-Walker [4].

A equação que guia a evolução das perturbações de matéria, que são as sementes das estruturas cósmicas, é a equação [53]

$$\ddot{\Delta} + 2H\dot{\Delta} - 4\pi G\rho_m = 0. \quad (57)$$

Essa equação dita o crescimento e evolução das estruturas cósmicas após a época do desacoplamento [4], e observáveis relacionados com a radiação cósmica de fundo, como o efeito Sachs-Wolfe Integrado, podem testar a sua validade.

De fato, o regime perturbativo é hoje entendido como o mais capaz de restringir e detectar

possíveis desvios da relatividade geral [11]. Futuras missões e satélites tem como objetivo importante mapear as escalas em que o Universo não pode ser mais descrito por um modelo homogêneo, com precisão inédita [54, 55], de modo a restringir maior os possíveis modelos que são capazes de descrever a evolução das estruturas.

Como discutido nos parágrafos que precedem 2, as propostas de Brans, Dicke e Dirac de tomar uma constante gravitacional G que varia com o tempo levou à ideia de um campo escalar acoplado à constante. Aqui vamos assumir que a constante gravitacional é função do tempo e das coordenadas espaço-temporais, e que depende da ação da teoria, definindo uma constante gravitacional efetiva $G_{\text{eff}}(\vec{x}, t)$. Um estudo completo das possíveis formas dessa função dentro do contexto de teorias escalar-tensoriais pode ser encontrado em [56].

A equação (57) então, se torna

$$\ddot{\Delta} + 2H\dot{\Delta} - 4\pi G_{\text{eff}}(\vec{x}, t)\rho_m = 0. \quad (58)$$

O fato de que agora a evolução das estruturas cósmicas possui uma dependência no tempo cósmico t e nas escalas \vec{x} deve mudar a história de como os grandes objetos no Universo se formaram, tanto no seu ritmo de criação, que está associada à derivada $d\Delta(z)/dz$, em função do redshift, e a distribuição dos objetos em função da escala k em que observamos eles no céu, $\Delta(k)$. Na cosmologia, uma maneira de se quantificar ambas as quantidades é através da função de crescimento $f(k, z)$, definida por

$$f(k, z) \equiv \frac{d \ln \Delta}{d \ln a} = \frac{1}{(1+z)\Delta} \frac{d\Delta}{dz}(z, k). \quad (59)$$

A função de crescimento, grosso modo, mede a quantidade de estruturas sendo formados por quantidade de estruturas já existentes. Explorar a distribuição de objetos em diversos redshifts é fundamental para restringir a forma dessa função, e logo as teorias gravitacionais possíveis [11, 57]. Usualmente, essa função é associada a uma escala específica, medida em 8 Gpc, que é onde define-se o chamado valor eficaz (ou, em inglês, *root mean square*) σ_M de aglomeração de estruturas [58], definido como $f\sigma_8 \equiv f(z, k) \cdot \sigma_M(k = 8 \text{ Mpc}, z = 0)$

Na Figura 5 podemos ver o gráfico da função de crescimento para diversos modelos de gravitação, como descritos na legenda, enquanto que na Figura 6 vemos uma compilação recente de dados

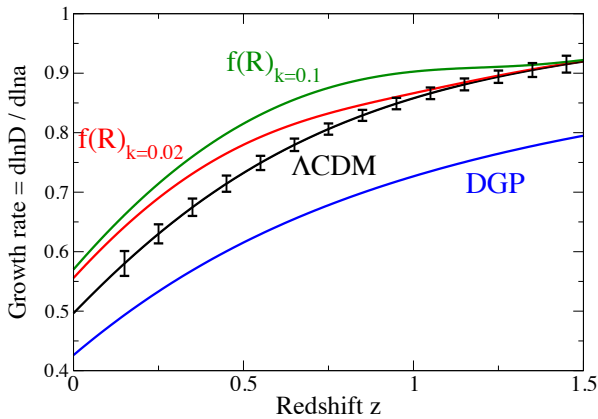


Figura 5: A função de crescimento para diferentes modelos, em diferentes escalas, plotada. As curvas verde e vermelha correspondem ao modelo exponencial de 29, em diferentes escalas k , enquanto que a linha preta corresponde ao modelo de concordância. A linha azul é do modelo DGP, que não é uma teoria escalar tensorial. Retirado de [57]

do observável [59], comparando o modelo padrão cosmológico com modelos com G_{eff} parametrizado.

A busca por observações nesse regime, mais precisas e em maiores intervalos de redshift, é um dos grandes objetivos da cosmologia observacional moderna [11, 57].

6 Conclusões

Como vimos, a relatividade geral ainda é nossa principal teoria gravitacional para explicar fenômenos astrofísicos e cosmológicos. Desde sua formulação original, há mais de um século, a teoria passou com louvor por todos os testes ao qual foi submetida.

Porém, fundamentalmente, a teoria está incompleta, uma vez que não leva em conta a descrição quântica do mundo físico. Assim, teorias alternativas à RG se proliferaram na tentativa de superar suas incompletudes. Em particular, teorias escalar-tensoriais e $f(R)$ constituem grande fonte de pesquisa atual nessa área.

Hoje, com os avanços tecnológicos, é possível realizar uma série de testes extremamente precisos dos fenômenos gravitacionais astrofísicos e cosmológicos. Em particular, a detecção de ondas gravitacionais e a cronometragem de pulsares, do lado astrofísico; e dos grandes surveys e a medição altamente precisa da radiação cósmica de fundo do lado cosmológico.

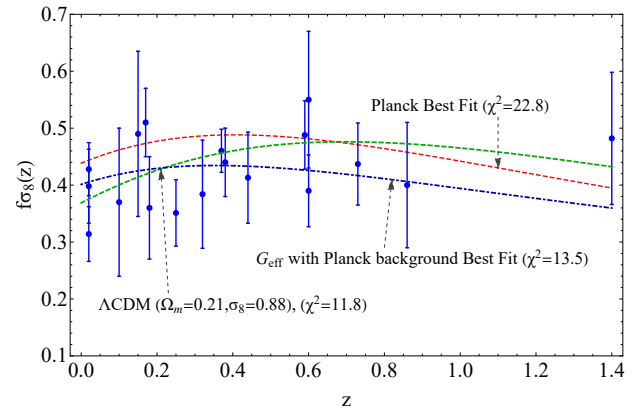


Figura 6: A função de crescimento escalonada pelo valor eficaz em $8Mpc$, a escala característica de observações de homogeneidade do Universo. As linhas tracejadas vermelha e verde são as do modelo cosmológico padrão, com parâmetros dados pelo Planck e pelos descritos na figura. A linha azul corresponde a um modelo com G_{eff} parametrizado por teorias escalar-tensoriais, como descrito em [59]. Retirado de [59]

Aqui, exploramos de forma geral, à guisa de revisão, teorias escalares-tensoriais e $f(R)$. Discutimos sua formulação básica, com alguns exemplos concretos e sua equivalência. Exploramos também alguns vínculos fortes que são colocados no espaço de parâmetros dessas teorias por meio de experimentos atuais, e quais observáveis e experimentos no futuro podem vir a restringir o espaço de teorias possíveis, principalmente dentro da cosmologia.

Ainda chamamos hoje a relatividade geral de “teoria padrão” da gravitação. No futuro, novos testes levarão a teoria ao seu limite experimental e é possível que detectemos desvios, tanto na astrofísica extrema de objetos compactos, como estrela de nêutrons e buracos negros, quanto em observações cosmológicas, como já observamos o efeito na expansão do Universo vindo da constante cosmológica. Precisamos assim, estar suficientemente maduros no estudo da fenomenologia de teorias alternativas para sabermos interpretar possíveis resultados além do escopo de previsões da RG.

Sobre o autor

Pedro Bessa (pedvbessa@gmail.com) é Mestre em Física pelo Observatório Nacional (RJ) e, atualmente, estudante de doutorado em física no PPGCosmo (UFES), com bolsa da Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES).

Sua pesquisa tem foco em cosmologia e teorias de gravitação.

Túlio Ottoni (tulioottoni.cosmoufes@gmail.com) é Mestre em Física pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e atualmente cursa o doutorado em física no PPGCosmo (UFES). É também professor substituto do Curso de Astronomia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sediado no Observatório do Valongo. Sua pesquisa tem foco em objetos astrofísicos compactos e gravitação.

Referências

- [1] C. M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics* (Cambridge University Press, 2018), 2 ed.
- [2] C. M. Will, *The Confrontation between General Relativity and Experiment*, *Living Reviews in Relativity* **5**, 1 (2006). [ArXiv: arXiv:1403.7377v1](https://arxiv.org/abs/1403.7377v1).
- [3] E. Poisson e C. M. Will, *Gravity: Newtonian, Post-Newtonian, Relativistic* (Cambridge University Press, 2014).
- [4] O. F. Piattella, *Introdução à relatividade geral*, *Cadernos de Astronomia* **1**(1), 30 (2020).
- [5] J. D. Toniato, *De newton a einstein: a geometrização da gravitação*, *Cadernos de Astronomia* **1**(1), 17 (2020).
- [6] M. H. Goroff e A. Sagnotti, *The ultraviolet behavior of einstein gravity*, *Nuclear Physics B* **266**(3), 709 (1986).
- [7] R. P. Feynman, F. B. Morinigo e W. G. Wagner, *Feynman Lectures on Gravitation* (Addison-Wesley, 1999).
- [8] I. L. Buchbinder e I. Shapiro, *Introduction to Quantum Field Theory with Applications to Quantum Gravity* (Oxford University Press, 2021).
- [9] A. G. Riess et al., *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant*, *The Astronomical Journal* **116**(3), 1009 (1998).
- [10] T. Clifton et al., *Modified gravity and cosmology*, *Physics Reports* **513**(1-3), 1 (2012).
- [11] P. G. Ferreira, *Cosmological tests of gravity*, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **57**(1), 335 (2019).
- [12] A. Joyce et al., *Beyond the cosmological standard model*, *Physics Reports* **568**, 1 (2015).
- [13] M. Peskin e D. Schroeder, *An Introduction To Quantum Field Theory* (Westview Press, New York, 1995).
- [14] C. Brans e R. H. Dicke, *Mach's principle and a relativistic theory of gravitation*, *Phys. Rev.* **124**, 925 (1961).
- [15] H. Weyl, *Gravitation und Elektrizität Gravitation and electricity*, *Sitz. Kön. Preuss. Akad. Wiss* **1918**, 465 (1918).
- [16] A. O. Barut, *Electrodynamics and Classical Theory of Fields and Particles* (Dover Publications, 1980).
- [17] J. Polchinski, *String Theory*, vol. 1 (Cambridge University Press, 1998).
- [18] P. A. M. Dirac, *The Cosmological Constants*, *Nature* **139**(3512), 323 (1937).
- [19] R. P. Woodard, *The Theorem of Ostrogradsky*, Tech. rep. (2015). [ArXiv:1506.02210v2](https://arxiv.org/abs/1506.02210v2).
- [20] R. M. Wald, *General relativity* (Chicago Univ. Press, Chicago, IL, 1984).
- [21] T. Sotiriou, V. Faraoni e S. Liberati, *Theory of gravitation theories: A no-progress report*, *International Journal of Modern Physics D* **17** (2007).
- [22] N. D. Birrell e P. C. W. Davies, *Quantum Fields in Curved Space*, Cambridge Monographs on Mathematical Physics (Cambridge University Press, 1982).
- [23] V. Faraoni, *Nonminimal coupling of the scalar field and inflation*, *Phys. Rev. D* **53**, 6813 (1996).
- [24] V. Faraoni, *A crucial ingredient of inflation*, *Int. J. Theor. Phys.* **40**(12), 2259 (2001).
- [25] R. F. P. Mendes e N. Ortiz, *Highly compact neutron stars in scalar-tensor theories*

- of gravity: Spontaneous scalarization versus gravitational collapse*, *Phys. Rev. D* **93**, 124035 (2016).
- [26] R. F. P. Mendes e T. Ottoni, *Scalar charges and pulsar-timing observables in the presence of nonminimally coupled scalar fields*, *Phys. Rev. D* **99**, 124003 (2019).
- [27] G. Esposito-Farèse e D. Polarski, *Scalar-tensor gravity in an accelerating universe*, *Physical Review D* **63** (2000).
- [28] B. Bertotti, L. Iess e P. Tortora, *A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft*, *Nature* **425**(6956), 374 (2003).
- [29] A. K. Verma et al., *Use of MESSENGER radioscience data to improve planetary ephemeris and to test general relativity*, *Astron. Astrophys.* **561**, 1 (2014). [ArXiv:1306.5569](#).
- [30] A. A. Starobinsky, *A new type of isotropic cosmological models without singularity*, *Physics Letters B* **91**(1), 99 (1980).
- [31] T. P. Sotiriou e V. Faraoni, *$f(R)$ theories of gravity*, *Reviews of Modern Physics* **82**(1), 451 (2010).
- [32] A. Dolgov e M. Kawasaki, *Can modified gravity explain accelerated cosmic expansion?*, *Physics Letters B* **573**, 1 (2003).
- [33] I. L. Buchbinder, I. L. Shapiro e S. D. Odintsov, *Effective Action in Quantum Gravity* (Bristol, 1992).
- [34] W. Hu e I. Sawicki, *Models of $f(R)$ Cosmic Acceleration that Evade Solar-System Tests*, *Physical Review D* (2007). [ArXiv:0705.1158](#).
- [35] E. V. Linder, *Exponential gravity*, *Physical Review D* **80**(12) (2009).
- [36] L. D. Landau e E. M. Lifshitz, *Mechanics, Third Edition: Volume 1 (Course of Theoretical Physics)* (Butterworth-Heinemann, 1976), 3 ed.
- [37] T. P. Sotiriou, S. Liberati e V. Faraoni, *Theory of gravitation theories: A no-progress report*, *International Journal of Modern Physics D* **17**(03n04), 399 (2008).
- [38] I. Alani e O. P. Santillán, *Cosmological singularity theorems for $f(R)$ gravity theories*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics* **2016**(05), 023 (2016).
- [39] J. Khoury e A. Weltman, *Chameleon Cosmology*, *Physical Review D* **69**, 044026 (2003). [ArXiv:0309411](#).
- [40] J. Khoury e A. Weltman, *Chameleon fields: Awaiting surprises for tests of gravity in space*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 171104 (2004).
- [41] K. Hinterbichler et al., *Symmetron cosmology*, *Physical Review D* **84**(10) (2011).
- [42] A. Vainshtein, *To the problem of nonvanishing gravitation mass*, *Physics Letters B* **39**(3), 393 (1972).
- [43] C. Burrage e J. Sakstein, *Tests of chameleon gravity*, *Living Reviews in Relativity* **21**(1) (2018).
- [44] C. Misner, *Gravitation* (Princeton University Press, Princeton, N.J, 2017).
- [45] R. F. P. Mendes, *Estrelas de nêutrons e seus múltiplos mensageiros*, *Cadernos de Astronomia* **2**(2), 58 (2021).
- [46] I. H. Stairs, *Testing general relativity with pulsar timing*, *Living Rev. Relativ.* **6**(1), 5 (2003).
- [47] N. Wex, *Testing Relativistic Gravity with Radio Pulsars*, in *Frontiers in Relativistic Celestial Mechanics*, editado por S. M. Kopeikin (De Gruyter, Berlim, 2014), vol. 2, 39.
- [48] T. Damour e G. Esposito-farese, *Nonperturbative strong-field effects in tensor-scalar theories of gravitation*, *Phys. Rev. Lett.* **70**(15), 2 (1993).
- [49] M. Kramer e N. Wex, *The double pulsar system: A unique laboratory for gravity*, *Class. Quantum Gravity* **26**(7) (2009).
- [50] M. Kramer et al., *Strong-field gravity tests with the double pulsar*, *Phys. Rev. X* **11**, 041050 (2021).
- [51] O. Piattella, *Lecture Notes in Cosmology* (Springer International Publishing, 2018).

- [52] N. Said et al., *New constraints on the dark energy equation of state*, *Physical Review D* **88**(4) (2013).
- [53] H. Velten, *Matéria escura e as estruturas cósmicas*, *Cadernos de Astronomia* **2**(1), 58 (2021).
- [54] M. Martinelli et al., *Constraining modified gravitational theories by weak lensing with Euclid*, *Physical Review D* **83**(2) (2011).
- [55] G.-B. Zhao et al., *Model-independent constraints on dark energy and modified gravity with the SKA* (2015). [ArXiv:1501.03840](https://arxiv.org/abs/1501.03840).
- [56] S. Tsujikawa, *Matter density perturbations and effective gravitational constant in modified gravity models of dark energy*, *Physical Review D* **76**(2) (2007).
- [57] D. Huterer et al., *Growth of cosmic structure: Probing dark energy beyond expansion*, *Astroparticle Physics* **63**, 23 (2015).
- [58] P. Coles, *Cosmology: the origin and evolution of cosmic structure* (John Wiley, Chichester, Eng, 2002).
- [59] S. Nesseris, G. Pantazis e L. Perivolaropoulos, *Tension and constraints on modified gravity parametrizations of $G_{eff}(z)$ from growth rate and Planck data*, *Physical Review D* **96**(2) (2017).

Einstein e sua famosa fórmula $E = mc^2$

Oliver F. Piattella

Università degli Studi dell’Insubria, Itália

Resumo

Uma das equações mais populares da física é a famosa fórmula da energia de repouso, $E = mc^2$, deduzida por Albert Einstein no desenvolvimento da teoria da relatividade restrita. O artigo onde as ideias que dão origem a essa equação são discutidas por Einstein é apresentado aqui em uma tradução direta do alemão para o português.

Abstract

One of the most popular equations of physics is the famous rest energy formula, $E = mc^2$, derived by Albert Einstein while developing the special relativity theory. The article where the ideas that give origin to this equation are discussed by Einstein is presented here in a direct translation from German to Brazilian Portuguese.

Palavras-chave: Einstein, relatividade especial, energia de repouso

Keywords: Einstein, special relativity, rest energy

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v3n2.38604](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v3n2.38604)

Introdução do tradutor

$E = mc^2$ é provavelmente a fórmula mais citadas por não físicos e um exemplo do gênio de Einstein. Mas o que essa fórmula significa?

Ela estabelece que a massa de um corpo (também chamada de *inércia*) é uma forma de energia e, portanto, pode ser transformada em outras formas de energia.

Uma das verificações experimentais mais importantes deste fato é representada pelo “defeito de massa”. Isto é, o fato que a massa de um núcleo atômico não seja igual à soma das massas dos seus constituintes, mas um pouco menor. Essa “falta” de massa é devida à energia de ligação que mantém o núcleo unido e que, mesmo não sendo associada a nenhuma partícula, possui uma massa pelo fato de ser uma energia. Aplicações do defeito de massa nuclear são (tristemente) famosas sob o nome de “energia nuclear”, usada para escopos civis (centrais nucleares) ou bélicos (bomba nuclear).

Surpreendentemente, Einstein descobriu $E = mc^2$ como bônus do desenvolvimento da teoria especial da relatividade. A descrição conjunta de espaço e tempo naturalmente leva a considerar a massa como forma de energia. Lembre-se que na física newtoniana a massa é uma qualidade intrínseca da matéria e não é transformável

em outras formas de energia, como por exemplo a energia cinética. Portanto, na física newtoniana, junto às famosas leis de conservação do momento e da energia coloca-se a lei de conservação da massa. Ao invés disso, na teoria especial da relatividade as três leis de conservação são contidas numa única lei (a da conservação do quadrimomento).

A tradução que segue é do artigo de Einstein: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*, publicado nos *Annalen der Physik* 18 (1905): 639–641. Este artigo pode ser considerado como uma pedra miliar na história de $E = mc^2$, onde esta fórmula nasceu, demonstrada por Einstein. Por outro lado, pelo menos três cuidados devem ser tomados:

- Neste artigo Einstein não escreve explicitamente $E = mc^2$; essa formulação da equivalência entre massa e energia é posterior (aparentemente de 1912, como encontrado num manuscrito de Einstein mesmo).
- A prova de $E = mc^2$ fornecida neste artigo está baseada em várias hipóteses simplificadoras, que foram bastante criticadas. Para saber mais sobre este aspecto, veja-se o artigo de Hans C. Ohanian: *Did Einstein prove $E = mc^2$?*, publicado em *Studies in History*

and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics, volume 40, fascículo 2, de maio 2009, páginas 167-173.

- Einstein não foi o primeiro a teorizar uma equivalência entre a massa e a energia. Várias tentativas ocorreram antes, no âmbito da eletrodinâmica. Para aprofundar este aspecto, veja a referência do Hans C. Ohanian citada acima.

No texto a seguir, as notas de rodapé referidas com um número seguido por uma parêntese (por exemplo 1)) são as notas de rodapé do texto original. As demais são notas do tradutor,

concebidas para ajudar a compreensão do texto.

Sobre o tradutor

Oliver F. Piattella (of.piattella@uninsubria.it) é Professor Assistente na Università degli Studi dell'Insubria, Como, Itália. Foi Professor do Departamento de Física da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), e pesquisador do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), de 2012 a 2021. Atua nas áreas de cosmologia e gravitação, tendo publicado mais de 50 artigos científicos e um livro texto de cosmologia intitulado "Lecture Notes in Cosmology".

13. A inércia de um corpo depende do seu conteúdo energético?¹

por A. Einstein

Os resultados de um estudo sobre eletrodinâmica que publiquei recentemente nestes anais²⁾ conduzem a uma consequência muito interessante, que será aqui derivada.³

Nesse estudo assumi a validade das equações de Maxwell-Herz no espaço vazio junto com a expressão maxwelliana para a energia eletromagnética do espaço.⁴ Além disso, foi assumido o seguinte princípio (princípio de relatividade): as leis segundo as quais os estados dos sistemas físicos mudam não dependem de qual de dois sistemas de coordenadas, que estão em movimento de transporte paralelo uniforme um em relação ao outro, é escolhido para relatar essas mudanças de estado.

Com base nestes fundamentos⁵⁾ eu deduzi, entre outras coisas, o seguinte resultado (l.c. § 8): considere-se um sistema de ondas planas de luz que possui, referido ao sistema de coordenadas (x, y, z) , energia l ; além disso, a direção da radiação (normal de onda) forme o ângulo φ com o eixo x do sistema. Ao introduzir um novo sistema de coordenadas (ξ, η, ζ) , em movimento de translação paralela em direção ao sistema (x, y, z) , cuja origem se move ao longo do eixo x com velocidade v , a quantidade de luz acima mencionada tem energia — medida no sistema (ξ, η, ζ) :⁶

$$l^* = l \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}, \quad (1)$$

onde V representa a velocidade da luz.⁷ Aproveitaremos desse resultado a seguir.

Esteja agora no sistema (x, y, z) um corpo em repouso, cuja energia — referida ao sistema (x, y, z) — é E_0 . Em relação ao sistema (ξ, η, ζ) , movendo-se como dito acima com a velocidade v , seja H_0 a energia do mesmo corpo.

Este corpo envia em uma direção que forma um ângulo φ com o eixo x ondas de luz planas de energia $L/2$ [medida em relação ao sistema (x, y, z)] e, ao mesmo tempo, uma quantidade equivalente de luz na direção oposta. Enquanto isso, o corpo permanece em repouso em relação ao sistema (x, y, z) . Para este processo o princípio de conservação de energia deve ser válido (de acordo com o princípio da relatividade) em relação a ambos os sistemas de coordenadas. Chamamos E_1 (respectivamente H_1) a

¹**Nota do tradutor.** Título original: *Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*. Publicado em: *Annalen der Physik* 18 (1905): 639–641. O número 13 na frente do título indica que o artigo é a contribuição decimo-terceira deste volume dos *Annalen der Physik*.

²A. Einstein, *Ann. d. Physik* **17**, p. 891. 1905.

³**Nota do tradutor.** O artigo ao qual o Einstein refere-se, A. Einstein, *Ann. d. Physik* **17**, p. 891. 1905, é o artigo fundador da teoria especial da relatividade, cuja tradução para o português, realizada por mim, foi publicada no primeiro número destes Cadernos de Astronomia.

⁴**Nota do tradutor.** As equações de Maxwell-Herz são chamadas hoje de equações de Maxwell (perdeu-se a referência ao Herz). A expressão maxwelliana para a energia eletromagnética do espaço é o fato que a densidade de energia do campo eletromagnético é dada pela soma dos módulos quadrados do campo elétrico e do campo magnético.

⁵O princípio de constância da velocidade da luz usado naquele estudo está obviamente contido nas equações de Maxwell.

⁶**Nota do tradutor.** No artigo original de Einstein as equações não são numeradas.

⁷**Nota do tradutor.** Hoje é padrão indicar a velocidade da luz no vácuo com c .

energia do corpo após a emissão da luz, medida em relação ao sistema (x, y, z) [respectivamente em relação ao sistema (ξ, η, ζ)]. Assim obtemos, através o uso da relação dada acima:

$$E_0 = E_1 + \left[\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right], \quad (2)$$

$$H_0 = H_1 + \left[\frac{L}{2} \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} + \frac{L}{2} \frac{1 + \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \right] = H_1 + \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}. \quad (3)$$

Por subtração, obtemos a partir dessas equações:

$$(H_0 - E_0) - (H_1 - E_1) = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}. \quad (4)$$

Ambas as diferenças de $H - E$ que aparecem nesta expressão têm significados físicos simples. H e E são valores de energia do mesmo corpo, referindo-se a dois sistemas de coordenadas em movimento relativo um em relação ao outro, enquanto o corpo permanece em repouso em um dos dois sistemas [o (x, y, z)]. É portanto claro que a diferença $H - E$ pode diferir da energia cinética do corpo referida ao outro sistema [o sistema (ξ, η, ζ)] apenas por uma constante aditiva C , que depende da escolha da constante aditiva arbitrária das energias E e H . Podemos, portanto, estabelecer:⁸

$$H_0 - E_0 = K_0 + C, \quad (5)$$

$$H_1 - E_1 = K_1 + C, \quad (6)$$

já que C não muda durante a emissão de luz. Então, temos:

$$K_0 - K_1 = L \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}. \quad (7)$$

A energia cinética do corpo em relação a (ξ, η, ζ) diminui devido à emissão de luz, e de uma quantidade que não depende em nada das características do corpo. Além disso, a diferença $K_0 - K_1$ depende da velocidade da mesma forma que a energia cinética do elétron depende dela (l. c. § 10).

Negligenciando as quantidades da quarta ordem e acima, podemos estabelecer:⁹

$$K_0 - K_1 = \frac{L}{V^2} \frac{v^2}{2}. \quad (8)$$

Desta equação segue imediatamente que se um corpo libera uma energia L sob forma de radiação, a sua massa diminui de L/V^2 . A respeito disso, é claramente desnecessário que a energia retirada do corpo se transforme em energia de radiação, de modo que somos levados à seguinte conclusão geral:

⁸**Nota do tradutor.** Esse é um dos pontos do trabalho de Einstein que foi bastante criticado por vários autores. Definindo a energia cinética de um corpo extenso (assim como de uma partícula) como a diferença entre a energia num estado de movimento e a energia de repouso, essa poderia ser uma função da velocidade diferente daquela do caso de uma partícula. De fato, não é garantido, e tem que ser provado, que a energia cinética de um corpo extenso e a de uma partícula sejam a mesma função da velocidade. Isso é devido ao fato que um corpo extenso pode ser formado de muitas partículas que se movimentam de forma relativística.

⁹**Nota do tradutor.** Esse é o ponto mais criticado do argumento de Einstein, pois a eficácia dessa demonstração de $E = mc^2$ é fortemente limitada por essa aproximação de baixas velocidades.

A massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo de energia; mudar a energia de uma quantidade L muda a massa no mesmo sentido de um valor $L/(9 \cdot 10^{20})$, se a energia for medida em erg e a massa em gramas.¹⁰

Não está excluído que para corpos cujo conteúdo de energia é altamente variável (por exemplo para sais de rádio), seja possível obter uma prova da teoria.

Se a teoria corresponder aos fatos, então radiação transfere inércia do corpo emissor para o outro absorvente.

Berna, setembro 1905

(Submetido no dia 27 setembro de 1905)

¹⁰**Nota do tradutor.** “no mesmo sentido” significa que se a energia aumenta a massa aumenta, e vice-versa. Einstein usa aqui o valor de c , a velocidade da luz no vácuo, no sistema CGS, ou seja $c = 3 \times 10^{10}$ cm/s.

A atualidade de Giordano Bruno

*“Em cada homem, em cada indivíduo,
contempla-se um mundo, um universo...”*

Giordano Bruno

Nos últimos anos a revista eletrônica *Cosmos & Contexto*¹ organizou várias conferências sobre Giordano Bruno. Alguns especialistas famosos vieram dar palestras e até mesmo um curso foi realizado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF). Da Itália veio o escritor e filósofo Nuccio Ordine; de Minas Gerais veio o professor Newton Bignotto; do Rio Grande do Sul veio o professor Luiz Carlos Bombassaro, entre outros.

As pessoas que não conhecem o quanto Giordano Bruno foi e é importante para a compreensão da evolução de nossas ideias sobre o universo podem se perguntar “por que esse interesse?” Vou tentar de modo simples e conciso responder a essa pergunta. Embora Giordano estivesse interessado em como conciliar seus argumentos de natureza científicos e sua relação com a Igreja, em compreender a relação entre o um e o múltiplo, entre Deus e a matéria, o que chama a atenção nos dias de hoje é sua concepção extremamente ousada à época, sobre a infinitude do universo e, como bem escreveu Bertrand Levergeois na introdução ao livro “L’infini, l’Univers et les Mondes”,² serviu para abrir as portas sobre o mundo supralunar para Kepler, Newton e outros astrônomos.

Mais importante para sua atualidade é seu conceito de solidariedade cósmica, capaz de produzir uma versão idealizada da coerência das leis que controlam o universo. Desse conceito, extrai ele a orientação que funciona como a ponte entre sua visão do cosmos e a sociedade humana. Com efeito, Giordano Bruno, no início da ciência moderna, alertava que o convívio social, a interação entre os homens, o ideal de sociedade, deveria ser consequência natural e necessária da intimidade humana com o universo. O que importa, diz ele, é, antes, reformar o céu e compreender a união indissolúvel entre a nossa humanidade, nosso comportamento social e o infinito universo. Talvez não exista uma maior expressão nos dias de hoje desse ideal de Bruno, do que a formulação da cosmologia contemporânea ao explicitar a transformação permanente do universo, não somente em suas configurações observáveis, mas em suas próprias leis. Dentre essas, talvez a mais fundamental seja a solidariedade entre suas partes. O termo solidariedade está aqui a ser aplicado como extensão de coerência, compatibilidade entre suas partes e é uma necessidade imprescindível no universo. Com efeito, consideremos, por exemplo, o primeiro cenário cosmológico do século 20 idealizado por Einstein. Esse modelo, por ser estático, sem pressão, sem interação entre suas partes, isto é, sem solidariedade, tem um tempo

¹<https://cosmosecontexto.org.br>

²Giordano Bruno, *L’infini, l’univers et les mondes* (Berg international, 2006).

exíguo de existência. Qualquer forma de perturbação, por menor que seja, que ocorra em algum lugar desse modelo cosmológico de Einstein gera uma catástrofe fazendo com que esse universo mergulhe no não-ser. Ou seja, esse modelo não pode se identificar com o universo em que vivemos. E qual a principal causa dessa limitada duração? Seu caráter estático, a ausência de dinâmica e de interação, inexistência de solidariedade, de compatibilidade entre propriedades local e global.

A frase “tudo está em transformação, nada estável perdura por muito tempo” que Marx utilizou para se referir à sociedade humana em sua crítica ao capitalismo, se aplica *ipsis litteris* ao universo. Com efeito, uma leitura atenta das investigações de fronteira da cosmologia ao longo das últimas décadas aponta a evidência dessa afirmação. E se tudo no universo está em transformação, se a posição estática (pensada muitas vezes como um cenário de estabilidade duradoura) não se adéqua à realidade, se as próprias leis físicas estendidas da Terra ao universo são afetadas pela disposição no espaço-tempo, onde vamos encontrar a origem desse movimento cósmico, dessa variabilidade do real? Onde está sua explicação?

E mesmo antes de procurar essa explicação, onde podemos exhibir essa mudança contínua, essa permanente variação? Essa evolução, que não possui uma orientação, que não deve ser atribuída a uma causa teleológica, aparece explicitamente na bem-sucedida união empreendida ao longo do século 20, entre o micro e o macrocosmo, entre a física das partículas elementares e o estudo das propriedades do universo, entre o local e o global, finalmente unificados como ensinava e se esforçava por mostrar o matemático-filósofo francês Albert Lautman. Exemplos simples e inequívocos de dependência cósmica das leis físicas com o tempo cósmico são a questão causal e o desbalanceamento matéria-antimatéria no universo. Como essas características são pouco conhecidas por aqueles que não estão acostumados com questões cosmológicas, precisamos falar delas, comentá-las, explicá-las, mesmo que brevemente.

A causalidade, no século 20 foi determinada a partir do reconhecimento de que nada, nenhum corpo material pode se movimentar com velocidade igual ou superior à da luz. Desse modo, todo observador, todo corpo material se movimenta dentro de um cone do espaço-tempo cujos limites são caminhos dos fótons, os grãos elementares da luz. Isso determina, sem nenhuma ambiguidade, passado e futuro para qualquer corpo material no interior desse cone. Aqui inter-vém a propriedade notável de que a gravitação, a interação que domina o cenário cosmológico, é universal. Isso significa que tudo, matéria ou radiação, sofre a ação gravitacional. Assim, em situações especiais (que não são as que ocorrem na Terra e em suas vizinhanças) a trajetória dos fótons pode ser encurvada de tal modo que em seu interior existam caminhos que conduzem ao passado. Isso ocorre, por exemplo, no cenário cosmológico descoberto pelo matemático austríaco Kurt Gödel em 1949. Ou seja, causalidade local não implica causalidade global. A relação causal pode depender da situação espaço-temporal, ou, para ser preciso, das propriedades do campo gravitacional. No laboratório terrestre observa-se que nas diferentes reações entre partículas elementares (como o elétron e o próton, entre outros) há certas leis de conservação que são interpretadas como se esses processos tivessem simetria perfeita entre o mundo das partículas e das antipartículas. No entanto, essa lei não é observada no universo profundo. Nosso cosmos é formado de matéria e não de antimatéria. O físico Andrey Sakharov na antiga União Soviética propôs entender essa ausência global de antimatéria por efeitos gra-

vitacionais que teriam ocorrido em uma fase extremamente condensada do universo, mostrando a dependência cósmica das interações entre os constituintes elementares da matéria.

Finalmente, é importante notar que contrariamente ao que nas últimas décadas se tem propagado, o universo não possui um tempo de existência finito, que levaria a questão dessa origem para fora do território da ciência. A união entre o mundo quântico e a universalidade da interação gravitacional leva a concluir que o universo é eterno. Mais ainda, que ele possui ciclos de expansão global de seu volume espacial seguido de fase de colapso que se repetem continuamente. Como esse processo é não-linear, não há necessidade de um agente externo para que ele ocorra.

Mesmo um universo sem nenhuma forma de matéria ou radiação não pode permanecer como tal. Isso é consequência direta de que o estado do vazio quântico, uma cooperação entre o quantum e o cosmos, é instável (corroborando os antigos que pretendiam que a natureza tem horror ao vácuo). O espaço-tempo se estrutura gerando um processo de auto evolução, típico da gravitação e de seus mecanismos não-lineares. Somos assim levados inevitavelmente à conclusão de que o universo estava condenado a existir.

Ao reconhecermos essa dinâmica do cosmos, a afirmação do filósofo Karl Marx de que a sociedade humana não permanece congelada e submissa a uma só estrutura social, adquire um alcance maior, absoluto e geral, pois a sentença fundamental desse filósofo de que tudo está em contínua transformação, se aplica naturalmente na cosmologia contemporânea. Mais do que isso, ela deve ser entendida como a síntese do conhecimento científico.

Ou seja, somos levados a aceitar a afirmação de Marx de que a verdadeira ciência é histórica, refletindo de modo preciso nosso conhecimento atual do universo. Isso nos leva ao seguinte comentário. No começo do século 20 os físicos se envolveram a retalhar o mundo. Com o sucesso da tabela de Mendeleiev, erigiu-se o conceito de que a totalidade se estrutura a partir de quantidades elementares, como átomos e, mais tarde, quarks e léptons.

Com o crescimento da cosmologia ao longo deste século uma posição oposta ascendeu no imaginário científico: a ordem estruturada a partir da totalidade, os elementos mínimos sendo organizações controladas pela grandiosidade do cosmos.

Essa acirrada disputa entre a predominância quer do local sobre o global, quer do global sobre o local só conseguiu ser pacificada com a entrada em cena de Lautman. Ele propôs conciliar a tradicional batalha envolvendo a dicotomia local versus global a partir do conceito de solidariedade cósmica, introduzindo, nos tempos modernos, a aplicação da noção de solidariedade ao universo. Entendemos então que um conceito jurídico, usado por semelhança na biologia e nas ciências sociais, pode ser empregado nas ciências da natureza, na física ou, de forma mais abrangente, na cosmologia, na caracterização de cenários cosmológicos de descrição do universo. A solidariedade cósmica – condição de compatibilidade entre processos locais e globais – sugerida nos primeiros anos de 1930 por Lautman, deveria induzir à solidariedade humana, mudando radicalmente a sociedade, como imaginava Giordano Bruno

Isso nos leva de volta a Giordano Bruno que acreditava que exibindo as maravilhas celestes – o que hoje reconhecemos como as centenas de bilhões de galáxias contendo cada uma delas centenas de bilhões de estrelas – e o modo como o universo parece solidário, os homens se tornariam melhores. As sociedades deixariam de lado as ilusões que as dividem e aceitariam a

grandiosidade do cosmos como uma dádiva que nos faz grandes e significantes. Essa característica comum de descrição da sociedade humana e do universo, permite então entender a intuição magistral de Giordano Bruno de que o ordenamento social deve se espelhar nas propriedades solidárias do cosmos.

As catástrofes cósmicas, a fusão de galáxias canibais, a variação das leis físicas com o tempo global, a eternidade do universo, sua definitiva autocriação, deveriam ser interpretadas como harmonia celeste na qual nosso eu, cada um de nós, pode se identificar.

Essa eternidade reconquistada no cosmos deveria ser a estrada principal que levaria a sociedade humana a uma unidade coerentemente heterogênea em sua múltipla diversidade. E, mais importante, sem a necessidade de sermos guiados por sacerdotes ou mesmo por cientistas.

Giordano acreditava que tinha o poder de usar essa crença em um mundo de comunhão com a natureza, para além da batalha darwiniana da sobrevivência, levando à solidariedade humana, refletindo assim a solidariedade cósmica. Em 17 de fevereiro de 1600, em Roma, no Campo de Fiori, Giordano Bruno foi queimado. Mostraram a ele quem efetivamente tinha o poder.

Adendo

Acrescento abaixo alguns trechos esclarecedores do curso sobre Giordano que o professor de filosofia Luiz Carlos Bombassaro (UFRGS) realizou no CBPF.

No contexto histórico e intelectual que costumamos designar como revolução copernicana, o filósofo Giordano Bruno (1548-1600) oferece argumentos decisivos para a transformação conceitual da cosmologia na Renascença.. Suas posições representam uma crítica radical ao pensamento cosmológico aristotélico-ptolomaico, ainda vigente na segunda metade do século XVI.

Associada às observações e aos cálculos astronômicos de Ptolomeu e Manílio, a cosmologia de Aristóteles estava, também do ponto de vista conceitual, firmemente ancorada nas ideias da imobilidade e centralidade da terra, da heterogeneidade e da hierarquia entre o mundo sublunar (terrestre) e supralunar (celeste), bem como da esfericidade e da finitude do cosmos.

É a partir de uma perspectiva de interpretação metafísica e cosmológica completamente diversa que havia se estabelecido desde a Antiguidade e se mantido hegemônica durante toda a Idade Média, que o filósofo Giordano Bruno desenvolveu suas reflexões sobre a unidade, a infinitude e a eternidade do universo, propondo assim a substituição daquele modelo de mundo fechado pela concepção de um universo infinito.

A filosofia bruniana é construída a partir da pressuposição sobre uma íntima conexão entre cosmologia e filosofia moral, entre natureza e ética. Nesse sentido, opera também no campo da ética e da moral aquele mesmo princípio que havia permitido a Bruno superar os limites da cosmologia aristotélico-ptolomaica e estabelecer a tese da infinitude do universo.

*Mario Novello**

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF

**Nota dos editores:* O presente texto é resultado de um convite feito pelo Núcleo Cosmo-ufes ao prof. Mário Novello para fazer a abertura da apresentação do filme *Giordano Bruno*, de Giuliano Montalde, realizada na UFES em 29 de julho de 2022. O prof. Novello fez uma preleção sobre Giordano Bruno antes da exibição do filme, e enviou o texto aqui reproduzido onde expressa sua visão sobre a contribuição de Giordano Bruno para a cosmologia moderna.