

CADERNOS DE ASTRONOMIA

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

GRAVITAÇÃO

AS DIVERSAS TEORIAS PASSADAS E PRESENTES PARA A GRAVIDADE

Ano 1 | Vol 1, -nº1 | 2020

A imagem de
um buraco
negro

Detectando
partículas na
atmosfera

Os primeiros
telescópios

A quem
pertence
a Lua?

Cadernos de Astronomia

ISSN 2675-4754

EDITORES RESPONSÁVEIS

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

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

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

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

CONSELHO CIENTÍFICO

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Prof. Dr. Wiliam Ricaldi (UFES)
whipolito@gmail.com

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

RESPONSÁVEIS GRÁFICOS

Amanda S. Fassarella (UFES)
fassarellaamanda@gmail.com

Matheus Bregonci Pires (UFES)
matheus.bregonci@hotmail.com

ENDEREÇO

Núcleo de Astrofísica e Cosmologia, CCE,
Universidade Federal do Espírito Santo,
Av. Fernando Ferrari, 514,
Goiabeiras, Vitória - ES - CEP 29075-910
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 amplo público, e podem ser submetidos à revista não apenas por profissionais trabalhando na área de ensino e/ou pesquisa mas também por qualquer interessado nos assuntos listados anteriormente.

Submissões

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

Núcleo Cosmo-ufes

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

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

PPGCosmo

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

Maiores informações:

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

Capa:

Imagem: Lua minguante, observado em 07 de agosto de 2019 em Castelo - ES (Créditos: Matheus Bregonci Pires)

Fundo:

Imagem: Via Lactea, observado em 02 de agosto de 2019 em Castelo-ES (Créditos: Matheus Bregonci Pires)

Carta ao Leitor

E nasce uma revista! Por que mais uma revista? Com os recursos informáticos disponíveis hoje, é tecnicamente simples criar uma revista online como esta. E muitas são criadas versando sobre os mais diversos assuntos, muitas visando um público mais restrito de especialistas, outras um público mais amplo. Em astronomia e física, no Brasil, temos hoje várias revistas de excelente qualidade abarcando desde a divulgação científica até a prática científica em todo seu rigor técnico e conceitual. E, assim, torna-se natural perguntar sobre a pertinência de se criar mais uma revista.

Para responder a esta pergunta é fundamental falar das origens deste projeto editorial e o seu escopo. A origem dos CADERNOS DE ASTRONOMIA tem raízes múltiplas. Em primeiro lugar houve a criação em 2016 do *Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação - PPGCosmo*, sediado na UFES, mas com a participação de pesquisadores de outras instituições brasileiras e do exterior. O *PPGCosmo*, desde sua origem, tem atuado não apenas na geração de conhecimento, na formação de recursos humanos, mas também na difusão do conhecimento, tanto para o público especialista quanto para o público em geral, incluindo estudantes e professores do ensino médio e fundamental. A necessidade crescente de uma maior aproximação entre as instituições de ensino superior e de pesquisa com o público não acadêmico e com o ensino de base tornaram estas atividades tão intensas, envolvendo inclusive profissionais não associados ao *PPGCosmo* que, em final de 2017, foi criado o *Núcleo de Astrofísica e Cosmologia da UFES - Núcleo Cosmo-ufes*, incorporando pesquisadores e professores da UFES que já colaboravam com os projetos do *PPGCosmo* e contando com apoio de professores do IFES. Assim, as atividades de divulgação científica e de apoio ao ensino de base puderam ser ampliadas, ganhando um novo dinamismo.

Uma das consequências destas atividades do *PPGCosmo* e do *Núcleo Cosmo-ufes* foi a criação da *Mostra de Astronomia do ES*, que teve sua primeira edição em 2018, sendo repetida em 2019 e também agora em 2020. A *Mostra de Astronomia do ES* intensificou os contatos entre pesquisadores e professores das instituições acadêmicas e científicas envolvidas no *PPGCosmo* e no *Cosmo-ufes* com estudantes e professores dos ensino fundamental e médio, assim como com o público em geral. Isto revelou a necessidade de uma publicação que refletisse esta nova dinâmica e que veiculasse as atividades não apenas dos profissionais das universidades e institutos de pesquisa como também os estudantes e professores dos ensino médio e fundamental, versando sobre astronomia, física e suas diversas ramificações. E (por que não?) que estivesse aberta a todos os interessados nestas ciências, participantes ou não do mundo acadêmico, aqueles que, na falta de melhor nome, denominamos de *grande público*.

E este é o escopo dos CADERNOS DE ASTRONOMIA e que dá sentido e justifica a criação de uma nova revista de ciência: uma revista que contenha contribuições de todo aquele amplo público e destinado a ser lido também por este mesmo amplo público, acadêmico ou não,

mas todos tendo em comum o interesse por astronomia e suas diferentes conexões. Assim, convidamos todos que se identificam com a área a se tornarem colaboradores de nossa revista, publicando seus textos conosco.

Neste primeiro número temos o privilégio de contar com artigos não apenas de pesquisadores de diversas instituições do Brasil e do exterior, como também de alunos e professores do ensino médio e fundamental, e dos interessados por ciência de maneira geral. O tema *Gravitação* é abordado de uma forma especial: uma série de textos procura retratar a construção das antigas e modernas teorias gravitacionais, esboçando também as pesquisas feitas atualmente no estudo desta interação que é, de acordo com a física contemporânea, uma das quatro interações fundamentais da natureza. Esta edição também traz o artigo *Astrologia e astronomia: os paralelos entre a crença e a ciência*, derivado do trabalho vencedor da última Mostra de Astronomia do ES, realizada em 2019.

Os CADERNOS DE ASTRONOMIA são construídos a partir destas contribuições de origens diversas, e visa ser lido por um público amplo de diferentes matizes. Esperamos que os textos que constam deste número inaugural reflitam os objetivos e ambições desta nova publicação científica e acadêmica.

Os Editores

Sumário

Seção Temática

A gravitação

Júlio C. Fabris et al. 5

Aristóteles e a gravitação

Júlio C. Fabris 6

De Newton a Einstein: a geometrização da gravitação

Júnior Diniz Toniato 17

Introdução à relatividade geral

Oliver F. Piattella 30

Matéria escura, energia escura e a busca por uma nova teoria para a gravitação

Hermano Velten 40

Divulgação Científica, Ciência e Sociedade

A primeira imagem de um buraco negro

Oscar T. Matsuura 52

O experimento de Tales

Richard Kerner 83

Os primeiros telescópios

Renato Las Casas 91

A quem pertence a Lua?

Alice Lopes Fabris 99

Artigos

Movimento de uma partícula interplanetária na atmosfera terrestre

José A. de Freitas Pacheco 108

Astrobiologia: como modelar o crescimento de organismos na Terra e em exoplanetas

Hermano Velten, Alcides Castro e Silva e Carlos Felipe Saraiva Pinheiro 116

Ensino

Sequências didáticas para o ensino de astronomia utilizando o Stellarium

Adriano M. Oliveira et al. 123

Astrologia e astronomia: os paralelos entre a crença e a ciência

Julia Cipriano Agrizzi et al. 138

Uma breve reflexão sobre a Mostra de Astronomia do Espírito Santo

Adriano M. Oliveira e Lúcia H. Horta Oliveira 144

A Escola vai à Mostra de Astronomia do ES: diálogos entre a educação formal, não formal e informal para o desenvolvimento da cultura científica

Lucia Helena Horta Oliveira 150

Textos Clássicos

O artigo fundador da teoria relatividade restrita

Oliver F. Piattella 157

Notas

Antônio Brasil Batista

Júlio César Fabris 177

A Mostra de Astronomia do Espírito Santo

Adriano M. Oliveira, Júlio C. Fabris e Júnior D. Toniato 179

A gravitação

Das quatro interações fundamentais da física contemporânea (gravitação, eletromagnetismo, interação fraca e interação forte), a gravitação foi a primeira a ser analisada de uma forma científica rigorosa. A grande síntese de Newton, no século XVII, com a teoria da gravitação universal, foi um dos marcos fundadores da ciência moderna. E, contudo, a gravitação continua sendo objeto de intensos estudos e especulações. Poucos físicos diriam hoje que a moderna teoria da gravitação, a relatividade geral, elaborada por Einstein no início do século passado, é definitiva. Na verdade, as questões em aberto da atualidade conduzem os cientistas não só a buscar estendê-la melhor como também propor modificações profundas em sua estrutura.

A teoria da relatividade geral ocupou o lugar da teoria newtoniana da gravitação, sendo a que melhor representa a nossa compreensão atual dos fenômenos gravitacionais. Mas mesmo a relatividade geral, considerada como uma das mais bonitas e elegantes teorias físicas, não é tida como a resposta final para a pergunta que é quase tão antiga quanto a ciência no sentido que a entendemos hoje: o que é a gravitação?

Aos fenômenos gravitacionais típicos como a queda dos corpos e as órbitas dos planetas, se juntaram mais recentemente novas manifestações dessa interação fundamental: a dinâmica das galáxias, a expansão do Universo e a formação de buracos negros. O estudo destes fenômenos, regidos essencialmente pela gravidade, trouxe novos problemas que apontam para os limites de aplicabilidade da teoria de Einstein. A isto se acrescenta a dificuldade em compatibilizar a interação gravitacional com os princípios da mecânica quântica, outro alicerce da física moderna.

Neste primeiro número dos *Cadernos de Astronomia* apresentaremos toda a complexidade da gravitação, os grandes sucessos obtidos na sua compreensão, e os enigmas que ainda a cercam. Os quatro textos que se seguem foram escritos por pesquisadores da área. Um dos objetivos é tornar acessível a um público não especializado esta dinâmica área da atividade humana: a pesquisa sobre o fenômeno gravitacional. Esperamos ter retratado adequadamente as dificuldades para responder a perguntas aparentemente simples, como por que os corpos caem ou a Lua gira em torno da Terra.

Júlio C. Fabris, Júnior D. Toniato, Hermano Velten e Oliver F. Piattella

Aristóteles e a gravitação

Júlio C. Fabris

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

A primeira formulação de uma física completa, do ponto de vista lógico, foi feita por Aristóteles no século IV a.C. A física aristotélica dominou o pensamento ocidental por quase dois mil anos. Tentarei mostrar neste texto que as teses aristotélicas contêm um primeiro protótipo de teoria gravitacional, inteiramente refutada a partir dos conhecimentos atuais, mas mesmo assim importante pelo contexto em que surge e por suas diversas implicações.

Abstract

The first formulation of a complete physics, from a logical point of view, was made by Aristotle in the 4th century BC. Aristotelian physics dominated Western thought for almost two thousand years. I will try to show in this text that the Aristotelian theses contain a first prototype of gravitational theory, entirely refuted from current knowledge, but nevertheless important for the context in which it arises and for its diverse implications.

Palavras-chave: Aristóteles, física, gravitação, cosmologia.

Keywords: Aristotle, physics, gravitation, cosmology.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.30464](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.30464)

1 Introdução

O objetivo deste artigo é discutir como a queda dos corpos, protótipo do fenômeno gravitacional, era entendido na Antiguidade, mais precisamente por Aristóteles, que foi talvez o primeiro sistematizador dos conhecimentos sobre a Natureza. Na ciência moderna, este fenômeno foi primeiramente explicado pela Lei da Atração Universal, formulada por Newton, no século XVII, à qual seguiu a descrição geométrica da teoria da relatividade geral, a moderna teoria da gravitação. As teses de Aristóteles sobre a queda dos corpos se encontram hoje ultrapassadas ou, mais precisamente, refutadas de forma inequívoca. Vale a pena analisá-las? Penso que sim, pois mesmo que erradas do ponto de vista da ciência moderna, as teses aristotélicas representam uma visão da natureza e do cosmo pelo menos coerente e, do ponto de vista lógico, completa.

Antes de entrar no âmago da física e da cosmogonia aristotélica, penso ser relevante falar um pouco do cenário fundamental da matéria e suas interações tal como descrito pela física contemporânea. A ambição maior da física é identi-

car os constituintes fundamentais da matéria, conhecidos como *partículas elementares*, e as interações entre estes constituintes. Todos os fenômenos observados devem, a priori, ser explicados usando as partículas elementares e suas interações. Na prática, a forma complexa como as partículas elementares se combinam e interagem constitui um grande entrave para uma explicação completa dos fenômenos observados usando estes elementos fundamentais. Mesmo assim, o sucesso que a física alcançou na descrição da natureza observada é notável. Somos capazes hoje de explicar fenômenos microscópicos, subatômicos, e fenômenos macroscópicos, mesmo em escalas cosmológicas, através de um conjunto pequeno de leis fundamentais. Desta forma, o domínio experimental e observacional abarcado pela física se estende de escalas da ordem de 10^{-18} m a 10^{26} m, com enorme sucesso.

O modelo padrão das partículas elementares resume o conteúdo de partículas e interações conhecidas. Este modelo inclui 6 tipos de partículas conhecidas como quarks, e 6 outras partículas conhecidas como léptons, organizadas em três *famílias*, cada uma contendo dois quarks e dois

léptons. As interações entre elas incluem a eletromagnética, bem conhecida, além de duas outras que são extremamente relevantes no mundo subatômico, mas dificilmente identificáveis no nosso mundo macroscópico, as interações forte e fraca. A elas devemos acrescentar uma quarta interação, a gravitacional, responsável pela queda dos corpos na superfície da Terra, e pelo movimento dos corpos celestes. Assim, além das três famílias de partículas elementares, a física se baseia hoje nestas quatro interações que dizem como estas partículas, reunidas nos corpos macroscópicos e microscópicos, agem entre si.

Das quatro interações fundamentais, a gravitacional é a que temos acesso mais direto e que podemos estudar de forma mais simples. Podemos, por exemplo, analisar os movimentos de queda de um corpo sobre a superfície terrestre. Assim, é natural que, das quatro interações, a gravitacional tenha sido a primeira a ser contemplada com uma formulação teórica, expressa na lei da gravitação universal de Isaac Newton (1643–1727) no século XVII. É a conhecida lei que diz que corpos massivos se atraem na razão direta do produto das massas e do inverso do quadrado da distância. A lei da gravitação de Newton teve um sucesso extraordinário na explicação da queda dos objetos sobre a superfície da Terra e do movimento dos corpos celestes. Hoje a moderna teoria da gravitação é a teoria da relatividade geral (RG) que descreve a gravitação como a geometria do espaço-tempo determinada pela matéria. No entanto, a teoria newtoniana continua sendo usada pois suas previsões só diferem substancialmente das previsões da RG quando as velocidades e/ou massas envolvidas são extremamente grandes.

Podemos dizer que a física moderna começa com os trabalhos de Galileu (1564–1642) e, sobretudo, com a publicação do livro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* [1] de Newton, em 1687, que lança as bases da Mecânica e da teoria gravitacional de uma forma coerente e sistemática. No entanto, a obra de Newton não é a primeira tentativa de se criar uma descrição coerente do movimento dos corpos, incluindo suas causas. No século IV a.C. Aristóteles (385–323 a.C.), um dos maiores pensadores da antiguidade, escreveu o livro que intitulou *Física*¹, e onde tenta sistema-

tizar o que conhecemos sobre o movimento, suas descrições, suas causas. As teses aristotélicas dominaram o pensamento humano por quase dois mil anos, sendo apenas abandonadas justamente pelos estudos de Galileu e Newton, entre outros investigadores que podemos denominar de *fundadores da ciência moderna*. Aristóteles defendia que o vazio não existe, o espaço estando totalmente preenchido por matéria, que o universo é esférico com o nosso planeta Terra no centro, e que os corpos caem pois eles buscam seu *lugar natural*, o centro da Terra.

Vale a pena se deter na análise de teses como estas, hoje já refutadas de forma inequívoca? Acredito que sim, e por vários motivos que vão além do puro interesse histórico. O principal deles é que a *Física* de Aristóteles é a primeira tentativa conhecida de desenvolver uma formulação sobre o movimento, sua descrição e suas causas, de forma completa, inteiramente lógica e com suporte na observação [2, 3]. Ele descreve e discute todos os conceitos necessários para a análise do movimento, inclusive realizando uma análise crítica do que até então havia sido dito a este respeito.

O filósofo Martin Heidegger, um dos mais importantes do período moderno, dizia que a *Física* de Aristóteles é o livro mais fundamental da filosofia ocidental. A afirmação pode parecer exagerada, mas Aristóteles neste livro tenta defender uma tese aparentemente óbvia mas no fundo complexa: a existência do *movimento* pode ser entendida de forma lógica, racional, coerente. Neste sentido, a *Física* de Aristóteles teria sido uma resposta aos chamados filósofos eleáticos, Parmênides, Zenon e Melissos principalmente. Estes filósofos, que viviam na chamada *Magna Grécia*, o sul da Itália, na cidade de Eléa, da qual hoje só restam algumas ruínas, negavam a realidade do movimento usando argumentos puramente lógicos: a razão não poderia compreender o fenômeno do movimento [4].² Na *Física*, Aristóteles mostra que o movimento pode ser entendido, que suas causas e descrições são acessíveis à razão.

Entre os movimentos estudados por Aristóteles está o da queda dos corpos, entendido moderna-

como filósofos pré-socráticos, tinha como título *Peri Physis*, equivalente a *Sobre a Natureza*.

²De forma muito sucinta, o argumento dos eleatas era que todo movimento implica que algo que existe deixa de existir, ou algo que não existe passa a existir. Esta passagem do ser ao não-ser, ou vice-versa, é algo que violaria a capacidade de compreensão racional.

¹A palavra *física* origina-se da palavra grega *physis*, cujo significado original é *natureza*. Os livros (a maior parte perdidos) dos primeiros filósofos gregos, conhecidos

mente como uma manifestação da interação gravitacional. Aristóteles diz que os corpos caem pois eles tendem ao seu *lugar natural*, o centro da Terra. Até que ponto isto pode ser levado a sério e ser objeto de algum interesse? A afirmação de Aristóteles está intimamente relacionada à sua visão do universo e à sua concepção do que é o movimento. Neste sentido, a tese sobre a queda dos corpos descrita por Aristóteles seria a primeira *teoria gravitacional*, falsa, hoje facilmente refutável, mas que tem ainda assim um sentido no âmbito da visão que Aristóteles tinha de da natureza e do universo. É isto que tentarei mostrar neste texto.

2 A Física de Aristóteles

Quando se fala na física aristotélica, alguns dos conceitos por ela estabelecidos surgem imediatamente à mente. Entre eles podemos citar.

1. Existem dois tipos de movimento: o natural e o forçado.
 - (a) No movimento *natural*, o corpo tende ao seu lugar *natural*. A fumaça sobe porque o seu lugar natural é nas altas camadas da atmosfera. A pedra cai pois o seu lugar natural é o centro da Terra.
 - (b) O movimento forçado implica que o corpo se desloca de uma forma não natural: uma pedra que é jogada para cima, por exemplo. O movimento forçado subentende o contato entre o objeto (a pedra) e o agente (a mão que sobre ela age). Todo o movimento forçado requer a ação de um agente sobre o objeto por contato.
2. Não existe o vazio, tudo está preenchido por matéria, mais densa ou menos densa. O movimento ainda assim é possível, um corpo cedendo lugar a outro. Se existisse o vazio, nenhum movimento seria possível pois o movimento implica em um contato entre o corpo e o agente que provoca o movimento. Não há força que age à distância.
3. O universo se compõe de um mundo sublunar, abaixo da esfera da Lua, onde há contínua mudança e transformação, e um mundo

supralunar, além da esfera da Lua, que contém a esfera das estrelas fixas, e onde não existe mudança.

- (a) Existem quatro elementos que compõem tudo o que observamos no mundo sublunar: a Água, o Ar, a Terra e o Fogo. Estes elementos sofrem contínuas transformações.
 - (b) O mundo supralunar é composto de um outro tipo de substância ao qual nós, que vivemos no mundo sublunar, não temos acesso direto. Na falta de outro nome, e como é a quinta componente do universo, dá-se o nome de *quintessência*.
4. O universo é esférico e finito. Nada há além das esferas fixas. A Terra ocupa o centro deste universo.

Todas estas concepções aristotélicas listadas acima são consideradas hoje, em princípio, superadas.³ Por exemplo, os quatro elementos que compõem o mundo sublunar, resultado das observações já feitas pelos pensadores gregos anteriores a Aristóteles, foram relegadas a uma importância puramente histórica, tendo em vista a moderna teoria atômica ou, para ser mais preciso, a moderna teoria das partículas elementares que identifica os constituintes fundamentais nas três famílias de quarks e léptons. O conceito também de quintessência deve-se ao fato que observava-se que as estrelas pareciam guardar uma mesma posição na suposta esfera que girava em torno da Terra (suposto centro do universo). Logo, as estrelas, e esta própria esfera onde estariam incrustadas, pareciam não estar sujeitas às mudanças como ocorre no mundo sublunar. Logo, pareceu natural a Aristóteles imaginar que elas eram constituídas de uma substância diferente da que conhecemos na região em que vivemos. Postulou então que seria uma substância única, distinta da que conhecemos e incapaz de sofrer transformação. Como seria a quinta componente do universo, denominou-a *quintessência*.

Muitas destas concepções aristotélicas são resultado da observação direta e sensorial da natureza que nos envolve e a que pertencemos. A

³Enfatizo o *em princípio* pois pode-se pensar, como veremos depois, que alguns destas concepções podem ser reinterpretadas pela física moderna

distinção entre movimento forçado e natural é um exemplo. Se tenho uma pedra na mão e se a solto, ela cai. Nenhum esforço é feito: eu simplesmente solto. Este é um movimento natural. Para que a pedra suba, eu tenho que impulsioná-la com a mão, tenho que fazer um esforço. Este é o movimento forçado. Outro exemplo é a existência do vazio. Ninguém percebe o vazio. Mesmo o ar, que eu não vejo, eu o sinto, quando corro por exemplo, ou quando venta.

“A natureza tem horror ao vácuo” é uma frase atribuída a Aristóteles, repetida figurativamente em várias circunstâncias hoje.⁴ Aristóteles dá um bonito exemplo de como esse *horror ao vácuo* funciona e como ele explica certos fenômenos naturais: o movimento de uma flecha lançada horizontalmente. Quando a flecha é lançada, ela sofre um impulso horizontal. Mas, o que a faz continuar no seu movimento horizontal (ou quase horizontal) quando o contato com o agente cessou? Ela deveria cair verticalmente para o seu *lugar natural*. A explicação é engenhosa: quando a flecha se desloca horizontalmente, ela movimenta a camada de ar, e cria o *vácuo* atrás dela; uma vez que a natureza tem horror ao vácuo, ar vem ocupar esta região e ao fazê-lo impulsiona a flecha mais para frente, e assim sucessivamente. O atrito da parte dianteira da flecha com o ar diminui o impulso, e ao mesmo tempo que a flecha se movimenta horizontalmente, ela perde impulso, e começa a se deslocar também verticalmente. Apenas no século XIV, mais de mil e quinhentos anos depois, esta descrição revelou-se inadequada pelos argumentos de Jean Buridan, importante filósofo e professor da Universidade de Paris, como discutiremos mais tarde.

Há uma outra interessante demonstração da não existência do vazio que é apresentada por Aristóteles na sua *Física*. Considere um corpo M se deslocando do ponto A ao ponto B em um meio com uma certa densidade ρ . Para que isto ocorra o corpo deve sofrer uma ação externa. Se a mesma ação atuar sobre esse corpo mas em um meio com a metade da densidade, o tempo T para o corpo ir de A até B cai pela metade. Diminuindo ainda mais a densidade, o tempo se torna ainda menor. Podemos resumir isto em uma fórmula que estabeleça que o tempo é diretamente

proporcional à densidade do meio:

$$T \propto \rho. \quad (1)$$

Ou mais precisamente,

$$T = k \frac{\rho}{D}, \quad (2)$$

onde D é a distância de A a B , e k é uma constante para ajustar as dimensões (obviamente estamos “modernizando” o raciocínio de Aristóteles). No vazio, definido como meio de densidade nula, $\rho = 0$, o tempo T se torna zero, e a velocidade para ir de A até B é infinita. Mas, a natureza não admite infinitos. Logo, o vazio não pode existir.

Que o movimento exija contato, é outra observação óbvia para Aristóteles. Para que um objeto em repouso se ponha em movimento, tenho que impulsioná-lo através do contato com minha mão por exemplo. A ação à distância, tão cara a Newton, não é algo intuitivo. Assim, o movimento é impossível no vazio, segundo Aristóteles, pois não há nada para impulsioná-lo. Ele fornece ainda um outro argumento para defender que o vazio não existe: no vazio um ponto A é idêntico ao ponto B . O movimento implica uma mudança. Mas, não há mudança nenhuma se um corpo sair do ponto A e for para um outro ponto B , já que no espaço vazio todos os pontos se equivalem. Aristóteles usa neste exemplo, de uma certa forma, o princípio de invariância por translação, algo extremamente importante na física moderna, mas em um contexto e com objetivos completamente distintos dos de hoje.

A *mecânica* aristotélica tem alguns aspectos interessantes, muito embora destoe completamente do que denominamos normalmente de *mecânica* hoje. Aristóteles raciocina muito engenhosamente sobre os fenômenos naturais. Mas, não faz experiências. Alexandre Koyré, um dos mais importantes historiadores da ciência, chama a atenção para uma transição importante quando a *ciência antiga* (Aristóteles, por exemplo) dá lugar à ciência nova (Galileu, Newton, por exemplo): o investigador deixa de contemplar unicamente a natureza para agir sobre ela. Isto abre as portas para a mecanização da nossa sociedade [5], fenômeno notável sobretudo a partir da Renascença.

Mas, como dizíamos, Aristóteles raciocina de forma engenhosa. Ele chega a sugerir uma fórmula no livro *Física* para o resultado de uma ação

⁴Em política por exemplo: “o poder tem horror ao vazio”.

sobre um corpo. O raciocínio é simplificado e o seguinte. Considere uma força F agindo sobre um corpo de massa M . Sobre a ação desta força, o corpo se move uma distância D em um tempo T . Se a massa do corpo for diminuída da metade, ele percorrerá uma distância $2D$ no mesmo tempo T , ou a distância D em um tempo $T/2$. Podemos arriscar escrever a fórmula matemática correspondente (Aristóteles não o faz, nossa maneira de se expressar matematicamente lhe sendo estranha):

$$F = M \frac{D}{T}. \quad (3)$$

Esta fórmula supõe algo importante, como já foi dito antes: o movimento só é possível quando há ação de alguma força (denominado simplesmente “ação”), cessando a força, cessa o movimento. Sob esta hipótese, a relação (3) se torna inevitável. Como corolário, a força faz o corpo ter uma velocidade, o conceito de aceleração sendo ainda muito pouco elaborado na física aristotélica.

Um outro aspecto importante da *mecânica* aristotélica se refere à impossibilidade de um movimento retilíneo uniforme eterno. Tal movimento é possível na mecânica newtoniana, onde o espaço é vazio e infinito (o espaço euclidiano). Isto é impossível para Aristóteles pois o universo aristotélico é finito e esférico. Logo, em um dado momento, o corpo em movimento deve voltar: não haveria para onde ir em um movimento retilíneo uniforme eterno. Por outro lado, ele considera que é possível um movimento circular eterno. Aliás, era isto que ele parecia observar, por exemplo, no movimento do Sol e das estrelas.

Mas, nosso assunto principal aqui é a gravitação. E para entender a gravitação é preciso ter em mente a concepção aristotélica do universo como uma esfera finita com a Terra em seu centro.

3 Uma teoria da gravitação

O que podemos chamar de *teoria aristotélica da gravitação* é algo bem simples. Se resumiria, em princípio à frase: o movimento natural dos corpos pesados é em direção ao centro da Terra, seu lugar natural. Em primeiro lugar o que Aristóteles tem em mente, ao se referir a *corpos pesados*, são os corpos constituídos, entre os quatro elementos, principalmente pela componente *Terra*. Sabemos que a fumaça sobe: seu lugar natural é nas altas

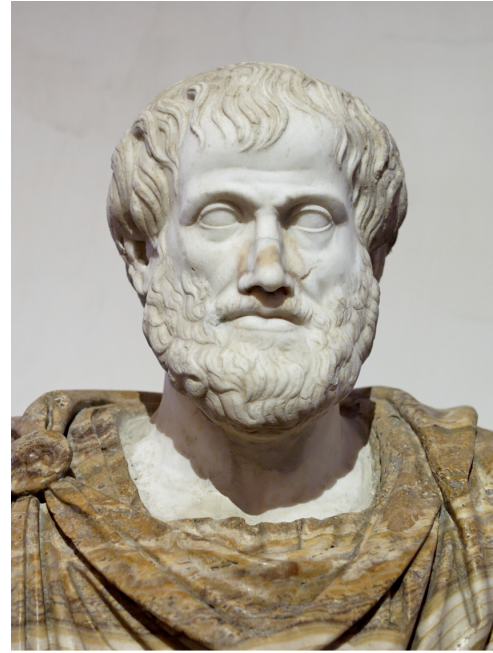


Figura 1: Busto de Aristóteles. Cópia romana a partir do original de Lisipo (século IV a.C.), que se encontra no Museo Nazionale Romano, Roma, Itália.

camadas da atmosfera. Logo, o Fogo e o Ar não “tendem naturalmente” para o centro da Terra. Quanto à Água, o fenômeno da chuva mostra que a situação é mais complexa. No entanto, a Água, grosso modo, se comporta de maneira próxima ao elemento Terra: como veremos depois, o lugar natural da Água seria a segunda esfera cósmica, que envolve a primeira esfera, a central, do elemento Terra. Para todos os propósitos, ao falarmos de corpos que têm como seu lugar natural o centro da Terra, consideraremos corpos pesados, compostos principalmente do elemento Terra mesmo que os demais elementos possam estar presentes em menor quantidade.

Uma teoria da gravitação que se resume à afirmativa “Os corpos pesados tendem a ir para o seu lugar natural, o centro da Terra” parece em princípio algo, além de errôneo, simplista e muito limitado. No entanto, a teoria aristotélica é bem mais rica. Na verdade, para aquela afirmação fazer sentido, é preciso não apenas uma visão do que a matéria é composta, como também uma construção cosmogônica que dê sentido à visão aristotélica do fenômeno da queda dos corpos, fenômeno que denominamos hoje de *gravitacional*.

Em primeiro lugar, Aristóteles precisava de uma teoria sobre a constituição da matéria. Ele usou a visão, grosso modo, empregada pelos seus

predecessores, que a matéria tem como elementos fundamentais constituintes a Água, a Terra, o Fogo e o Ar. Ao contrário de algum dos seus predecessores, não elegeu nenhum desses elementos como sendo o *elemento primordial*: todos os quatro têm o mesmo status.⁵ Mas, acrescentou um quinto elemento, a quintessência, que comporia o mundo supralunar, onde não há mudança, ao contrário do mundo sublunar, onde vivemos, em que a mudança é constante. A gravidade, entendida como queda dos corpos, agiria sobre os elementos pesados, constituídos principalmente pelo elemento Terra.

No entanto, isto não basta. Os elementos pesados devem tender para o centro da Terra. Isto supõe uma estrutura do cosmos. Em primeiro lugar, a Terra deve ser esférica. Mais que isto, aliás: o universo deve ser composto de esferas concêntricas, a primeira a do elemento Terra, a segunda do elemento Água, depois Ar, Fogo, Lua, Mercúrio, Vênus, Sol, e assim por diante, sendo a mais distante delas a esfera das estrelas fixas, composta, como todas as esferas a partir da Lua, do elemento quintessência. Além da esfera das estrelas fixas não existe nada, sequer espaço. Assim, a forma do universo é não apenas esférica, mas também sua dimensão é finita. Na Figura 2 é mostrada uma representação renascentista do cosmo aristotélico. Nesta estrutura, pode-se falar de um *centro*: o centro da Terra é o centro de todo o universo. Logo, a afirmação de que os objetos pesados caem para o centro da Terra tem uma significação absoluta e inequívoca.

A concepção aristotélica de um *lugar natural* para onde os objetos tendem adquire um sentido neste mundo esférico e finito. Se Aristóteles tivesse dito que os objetos tendem para um ponto qualquer do espaço, esta afirmação seria totalmente arbitrária. Por que este ponto e não um outro? Mas, esta arbitrariedade não existe na concepção de um lugar natural para onde os objetos tendem, tal qual Aristóteles concebeu: para os corpos pesados, o lugar natural no caso é o centro do universo, que coincide com o centro da Terra, pois a Terra ocupa a posição central nesta estrutura cósmica. Esta *gravitação aristotélica* requer o geocentrismo, assim como requer um universo finito. Há uma visão cósmica coerentemente for-

mulada, do ponto de vista lógico, em acordo com a noção de *lugar natural para onde os corpos pesados tendem*. Mais precisamente, os elementos fundamentais tendem a ir *naturalmente* para suas esferas correspondentes. Os movimentos forçados provocam a mistura dos elementos.

A escolha da forma esférica para o universo é absolutamente normal para a época. O universo deveria, na visão dos gregos, ter uma forma simples e perfeita. A esfera preenchia estes requisitos, assim como o círculo preencheria também os requisitos no que diz respeito ao movimento dos astros. A forma de se proceder a uma construção científica (e em certo sentido hoje também) na época buscava a *simplicidade*: o círculo, a esfera, pareciam ser as formas mais simples e perfeitas. Era muito estranho para a mentalidade grega de então imaginar que as órbitas pudessem ser elipses ou qualquer outra figura mais complicada, ou que um astro ou mesmo o universo pudesse ter uma forma mais complexa que uma esfera, uma elipsoide por exemplo. Tal forma de construir o mecanismo cósmico, seguindo os padrões de simplicidade e perfeição, iria guiar a visão do cosmo até a Renascença, permeando até mesmo a visão cósmica de Copérnico⁶, que ainda consideraria as órbitas, da mesma forma que Ptolomeu⁷, como uma combinação de círculos.

Seria possível, na estrutura concebida por Aristóteles, em princípio, se perguntar o que aconteceria com um objeto que caísse na Lua, ou em outros planetas. Mas, tal tipo de questão soaria estranha à mentalidade grega de então, pois ela teria como pressuposto que a Lua e outros planetas eram *mundos* como o nosso. No entanto, estes objetos eram vistos como parte da estrutura cósmica que se limita a girar em torno da Terra (os planetas de uma forma bastante irregular, aliás, como se veria depois). Soa inconcebível que haja uma pedra na Lua que possa ser jogada. O mundo, lugar onde os fenômenos ocorrem, onde existe alguém para observar o que acontece, é apenas a Terra, centro de todo o universo. Admitir vários mundos anulava toda a construção lógica de Aristóteles, pois se há vários mundos há vários centros possíveis, e a noção de lugar natural es-

⁵Entre os filósofos pré-socráticos, Tales de Mileto (624–546 a.C.), egeria a Água como sendo o verdadeiro elemento fundamental dos quais os outros se compõem, Heráclito (500–450 a.C.), diria ser o Fogo, etc. [4]

⁶Nicolaus Copérnico (1473–1543 d.C.), primeiro formulador consistente de um sistema heliocêntrico, com o Sol no centro, exposto no livro *Da revolução das esferas celestes*.

⁷Claudio Ptolomeu (90–168 d.C.), sistematizador do sistema geocêntrico exposto em sua obra *Almagesto*.

Schema huius præmissæ diuisionis Sphærarum .



Figura 2: Representação do cosmo aristotélico por Petrus Apianus contida no seu livro *Cosmografia*, 1524.

taria em dificuldades. Vê-se também nesta estrutura que o mundo teria que ser finito: um mundo infinito acabaria com a noção da esfera das estrelas fixas, de limite a partir do qual o universo termina. E em um universo infinito, a noção de centro também desaparece.

É preciso alertar que a concepção *gravitacional* aristotélica tem aspectos mais complexos do que o exposto aqui. Afinal, por que um corpo *precisa* ir para o seu *lugar natural*? Sem entrar muito em detalhes, há no aristotelismo os conceitos fundamentais de existir *em potência* e existir *em ato*. Em um bloco de mármore, uma estátua existe *em potência*. Quando o escultor cria uma escultura a partir do bloco de mármore, a estátua passa a existir *em ato*. Todo o movimento implica a passagem de um estado em potência para um estado em ato. É através destes conceitos de potência e ato que Aristóteles procura contornar as dificuldades lógicas dos filósofos eleáticos. O lugar natural da pedra que está na minha mão, é o centro da Terra. Minha mão impede que ele ocupe este lugar pois minha mão impede (ação forçada, não natural). Mas, a pedra está *em potência* no seu lugar natural, não *em ato*. Ao soltá-la, ela passa da sua condição em potência para sua condição em ato. Tudo isto pode nos parecer estranho, mas o edifício lógico de Aristóteles é, no final, muito bem concatenado.

A *gravidade aristotélica* nos soa estranha, so-

bretudo depois que Galileu, Kepler⁸ e Newton revelaram os principais aspectos da interação gravitacional e que são confirmados pela observação. Na gravidade newtoniana, em especial, o vazio é essencial, a gravidade é uma força, uma interação, que age à distância, as órbitas são elipses, e o formato dos corpos celestes é na verdade mais próximo de uma elipsoide devido à rotação destes corpos em torno do seu próprio eixo. No entanto, impressiona a coerência lógica da construção de Aristóteles e o fato de se ater ao que se conhecia e se podia observar na época. A física aristotélica é tão bem concebida, para o nível de conhecimento que se tinha então, que viria a reinar por quase vinte séculos.

4 Um longo domínio

Costuma-se dizer que a física aristotélica dominou o pensamento humano durante quase dois mil anos. De fato, o sistema aristotélico foi uma referência fundamental em filosofia (e, por extensão, em ciência) do século IV a.C. até aproximadamente o século XV. Este domínio só teria sido encerrado com o aparecimento de novas práticas científicas no final da Idade Média, início do período renascentista. É difícil estabelecer datas precisas desta mudança. Tal mudança constitui o que o historiador da ciência Thomas Kuhn denominaria de *mudança de paradigma*: um paradigma é uma forma estruturada de fazer ciência na qual os tipos de perguntas e procedimentos para responder a essas perguntas possuem um sentido; uma revolução científica implica em uma mudança de paradigma [6]. Na física aristotélica por exemplo perguntar como um corpo cairia na Lua, como já discutimos, não faz sentido pois a Lua pertence a outra esfera não submetida aos mesmos fenômenos que ocorrem na Terra. Para que esta pergunta faça sentido, temos que admitir que a Lua é um objeto similar ao nosso planeta Terra. Aliás, já teríamos que admitir que a Terra é um planeta como vários outros. Tudo isto é absolutamente estranho às concepções desenvolvidas por Aristóteles, tanto na física quanto na cosmogonia, dois domínios simbióticos em Aristóteles, como já discutimos.

⁸Johannes Kepler (1571–1630), astrônomo alemão que descobriu que os planetas seguiam órbitas elípticas, e não circulares, em torno do Sol.

O fato é que o paradigma aristotélico (no sentido de Kuhn) teria começado a desmoronar a partir do século XIII. Um dos atores para esta *revolução científica* teria sido Roger Bacon (1214–1292), um frade franciscano inglês que desenvolveu vários estudos experimentais, principalmente em ótica, e que foram muito importantes posteriormente inclusive para o desenvolvimento do telescópio e do microscópio. Ele teria concebido a noção de *leis da natureza*, tão cara à física moderna, e teria sido um dos artífices do método indutivo, partindo dos fatos particulares que seriam sistematizados em uma lei. No entanto, em um estudo sobre a origem da ciência moderna, Koyré [7] diz que não podemos remontá-la a Bacon e outros contemporâneos seus: a ciência moderna, em particular a física, teria sua raiz mais tarde, em Galileu em especial devido à ideia da *matematização* da natureza: a natureza é escrita na linguagem matemática, diria Galileu, e isto é fundamental para entender a física atual.

No entanto, o domínio das concepções de Aristóteles por quase dois mil anos tem que ser visto com certo cuidado. Em primeiro lugar, não foi um domínio tão absoluto quanto se pensa: seu mestre na juventude, Platão, influenciou muito o pensamento ocidental durante este período. Platão e Aristóteles são duas concepções diferentes da ciência: enquanto Platão elegia a matemática como a ciência fundamental, Aristóteles considerava o estudo da natureza como o ponto de partida de toda ciência; Aristóteles considerava que o que vemos e sentimos *existe*, ao passo que Platão considerava que a verdadeira existência é atributo das Ideias imutáveis e perfeitas, que existem em um plano unicamente acessível pela razão e pela abstração, e das quais tudo o que vemos e sentimos são apenas cópias mutáveis e imperfeitas. A diferença entre os dois é tão profunda que uns vêm Aristóteles como pai (ou avô) do realismo nas artes, enquanto Platão seria o primeiro teórico da arte abstrata: para Aristóteles, a arte é imitação da natureza; para Platão, a arte é uma representação daquelas Ideias perfeitas e imutáveis que não são diretamente percebidas no mundo real.

É preciso lembrar também que Aristóteles ficou praticamente esquecido em boa parte do período medieval, pelo menos no mundo ocidental. No entanto, ele teria sido “preservado” pelos sábios árabes, principalmente Avicena (980–1037) e Averróis (1126–1198). Aristóteles seria

em seguida redescoberto no ocidente, e sua filosofia seria *cristianizada* por São Tomás de Aquino (1225–1274) que criaria um monumental edifício teológico profundamente inspirado pelas ideias de Aristóteles, a *Suma Teológica*, e que até hoje pode ser considerado como a teologia oficial da Igreja Católica [8]. Nesta estrutura teológica, não apenas certos conceitos da física de Aristóteles seriam usadas para tentar fundamentar *provas* da existência de Deus (o “primeiro motor”⁹ do movimento que observamos), como também a concepção da Terra e do Céu seguiria a estrutura das esferas celestes de Aristóteles.¹⁰ Platão também influenciaria, paralelamente, o pensamento religioso ocidental através, por exemplo, de Santo Agostinho (354–430). Mas, Aristóteles seria, para a maior parte dos estudiosos, religiosos ou não, a principal fonte de pesquisa até que, efetivamente, uma mudança de paradigma se completasse a partir da Renascença. Curiosamente, a revolução então operada a partir da Renascença, através do papel da matemática e da geometria na descrição da Natureza, implica uma certa identificação com Platão, para quem essas ciências são portas de acesso às Ideias eternas e imutáveis.

5 Superando Aristóteles: rumo a Galileu e Newton

O caminho que leva à superação das teses aristotélicas e possibilita o surgimento da ciência moderna é longo e não se resume a uma fase específica da história. A sistematização dos conhecimentos matemáticos sobre o espaço e a consequente formulação de uma geometria consistente, consubstanciada no livro *Elementos* de Euclides (século III a.C.), é um dos primeiros passos. Embora um dos aspectos-chaves da Cosmogonia aristotélica fosse o universo esférico, finito, não há uma preocupação de estabelecer uma visão geométrica. Newton, por sua vez, no século XVII

⁹O conceito de *primeiro motor* é muito importante em Aristóteles. Sucintamente pode ser resumido como se segue. *A* é o agente do movimento de *B*. Mas, algo tem que ser responsável pelo movimento de *A*. A cadeia de *agentes do movimento* se estende até algo que é causa de movimento mas que ele próprio não é movido por nenhum outro agente. Este é o *primeiro motor*. Para São Tomás de Aquino, este primeiro motor seria Deus.

¹⁰Veja a descrição do Paraíso na *Divina Comédia* de Dante Alighieri (1265–1321), um dos livros fundadores da literatura ocidental e da língua italiana [9].

terá necessidade da geometria euclidiana para formular a *nova* física que substituirá a *antiga* física aristotélica. E por sua vez, a relatividade geral, moderna teoria da gravidade, tem como elemento chave a geometrização da interação gravitacional.

Mas, há outros aspectos. No espaço euclidiano, vazio e infinito, o movimento retilíneo eterno é concebível, ao contrário do que defendia Aristóteles. A noção de que a natureza tem horror ao vácuo, e que consequentemente o vácuo não pode existir, também é questionada e, finalmente abandonada. A física de Newton requer a possibilidade de existir o vazio. Nós já discutimos anteriormente como alguns argumentos de Aristóteles contra a possibilidade de existir o vazio, como no caso do movimento da flecha lançada, foram questionados e praticamente invalidados no início da Renascença. É importante salientar que alguns predecessores de Aristóteles defendiam a existência do vazio. Tal era o caso dos atomistas gregos, como Demócrito (460–370 a.C.). As teses atomistas, e consequentemente a realidade da existência do vazio, nunca foram esquecidas. Mas, foram relegadas a um plano secundário diante da autoridade de Aristóteles, até serem colocadas novamente em evidência por uma sequência de trabalhos, primeiro pela chamada *escola nominalista de Paris* (Jean Buridan e Nicole d’Oresme), depois pelo próprio Galileu e finalmente por Newton.

No caso da flecha lançada, que descreve o que hoje chamamos de *trajetória parabólica*, uma explicação diferente da de Aristóteles é formulada por Jean Buridan (1295–1358). O problema é como a flecha (ou uma pedra, se preferir) pode continuar seu movimento horizontal quando já perdeu contato com o agente, a mão que a lançou. Como vimos Aristóteles explica isto através do horror ao vazio. Buridan formula um argumento que questiona tal hipótese: se for uma flecha com a parte traseira que se afina, como este horror ao vazio poderia ser eficaz? Ele formula, alternativamente, a teoria do *impetus*: a mão transmite ao objeto um impetus que a projeta na direção que foi lançada. Este impetus é enfraquecido pela resistência do ar (algo que também desempenha um papel importante na explicação aristotélica do fenômeno) e o objeto, ao mesmo tempo que se desloca para frente, começa a cair, como de fato observamos, mas agora devido à perda do seu impetus. Buridan chega a estabelecer uma lei

de conservação: o impetus é conservado, a mão transferindo impetus para a flecha. E mais: a quantidade de impetus é proporcional à massa do corpo pela sua velocidade. Estão lançadas as bases para um dos conceitos mais importantes da Mecânica Newtoniana: o momento linear.

Uma das teses centrais da física de Aristóteles, e que sustentava sua *teoria gravitacional*, baseada na noção de lugar natural, era a do geocentrismo, a Terra como centro de um universo esférico e finito. Esta tese foi superada pelo sistema heliocêntrico proposto por Copérnico, depois aperfeiçoado por Galileu, Kepler e, finalmente, Newton. No entanto, não foi um caminho fácil colocar o Sol no centro e a Terra girando em torno dele. Para fazer isto, há algo que deveria ser mostrado possível mas que não era aparentemente em acordo com a observação: pode-se estar em movimento sem se perceber. Na verdade, seria preciso mostrar que o conceito de movimento pode ser puramente relativo, o observador se vendo sempre em repouso, e vendo os demais objetos se moverem.

O nome de Galileu é intimamente associado à esta concepção de que todo o movimento é relativo. Na física moderna as transformações conectando diferentes observadores (sistemas de referências) levam o nome de *transformações de Galileu*. No entanto, conceitualmente, esta questão já tinha sido abordada por um dos membros da escola nominalista de Paris no século XIV, quase duzentos anos antes de Galileu, Nicole d’Oresme (1323–1382), discípulo de Buridan. Ele diz explicitamente que se um observador está em um navio *A* e vê um outro navio *B* que se desloca, para ele sempre será este outro navio *B* que estará em movimento mesmo que, se em relação à margem, *B* esteja parado e *A* em movimento. Simetricamente um observador em *B* se dirá sempre em repouso atribuindo o movimento ao navio *A*: o movimento é sempre relativo.

Nicole d’Oresme faz outras afirmações importantes, cruciais para esta transição da física aristotélica para a física Moderna [10]. Ele diz, por exemplo, que se um observador que está em um navio que se desloca em movimento retilíneo uniforme deixar cair uma pedra, ele verá a pedra cair verticalmente, como se o navio estivesse parado. Até então se acreditava que a pedra “ficasse para trás” quando solta em um navio em movimento. A constatação feita por Nicole d’Oresme é crucial para que possamos estar sobre a Terra, que se

move em relação ao Sol, sem que nos apercebamos disto. Aliás, ele diz explicitamente que, se por algum fenômeno desconhecido, a Terra passasse a girar em torno do Sol, e não o Sol em torno da Terra, ¹¹ nós na Terra não nos aperceberíamos e sempre diríamos que é o Sol que gira em torno da Terra pois nós observamos tudo a partir da Terra (é o nosso “navio”). A via para o heliocentrismo estava aberta sem que a percepção do movimento da Terra, por quem nela habita, constituísse um empecilho.

6 Conclusão

A física aristotélica foi relegada, em quase sua totalidade, ao domínio da história da ciência. Sabemos hoje que a Terra não é o centro do universo, e que os astros celestes são compostos da mesma matéria que o nosso mundo imediato, o planeta Terra. A distinção de mundo sublunar e supralunar desapareceu. Com isto, com a nossa visão do universo como composto de estrelas que se organizam em galáxias, aglomerados de galáxias e mesmo outras estruturas mais complexas, não é possível explicar a queda dos corpos como uma tendência dos corpos pesados de irem para o centro da Terra, seu *lugar natural*. Este *lugar natural* não existe mais. A *gravidade* aristotélica foi substituída, primeiro, pela gravitação universal de Newton, uma interação que age a distância, sem a necessidade de contato entre os corpos. Por sua vez, a gravitação newtoniana deu lugar à teoria da relatividade geral, que explica a gravitação através da geometria do espaço-tempo. Além disto, a noção de força que provoca o movimento por contato, dando velocidade aos corpos, foi totalmente revista pela mecânica de Newton: a partir de Newton, força, além de poder agir sem contato, provoca aceleração do corpo, não velocidade.

A física moderna é inteiramente distinta da de Aristóteles, e seria uma insensatez, por exemplo, ensinar física hoje usando Aristóteles, que só pode ser evocado em disciplinas de história da ciência ou de filosofia. No entanto, a *Física* de Aristóteles continua sendo um livro extraordinário, como frisou Heidegger, citado na Introdução: ele

¹¹Nicole d’Oresme se declara geocentrista mesmo que reconheça que o movimento da Terra em torno do Sol é uma possibilidade, não podendo ser detectado por experiências simples feitas na Terra.

constrói de uma forma rigorosa uma ciência do movimento usando as observações disponíveis na época, além de uma lógica admirável. Ele introduz todos os conceitos fundamentais necessários para desenvolver o tema: o que é *lugar*, o que é *natureza*, as diferentes formas de falar de *movimento*, o que é *matéria*, entre vários outros conceitos. Se a física aristotélica não é mais a ciência física que conhecemos, o procedimento adotado por Aristóteles permanece um exemplo de rigor e de procedimento intelectual honesto e de caráter científico.

Dissemos acima que a física aristotélica foi refutada “em quase sua totalidade”. De fato, alguns conceitos aristotélicos podem ainda hoje ser objetos de discussão científica, mesmo que de uma forma bem diferente da sua versão original. Um exemplo é a questão da existência ou não do vázio. Aristóteles negava a existência do vázio, vázio que se tornaria essencial na mecânica e gravitação de Newton. Mas, falamos de “energia do vácuo”, candidato notável para descrever a “energia escura” que aceleraria o universo hoje. Esta nova visão está associada ao conceito de vácuo em teoria quântica de campos, e este vácuo dificilmente pode ser considerado como o *vazio* de Newton, tendo pontos de contato com o *pleno* aristotélico, mesmo que tal associação mereça ser mais profundamente discutida, sendo obviamente controversa. Além disto, Aristóteles faz uma distinção entre física e matemática que poderia ser inserida numa discussão moderna sobre o assunto [11].

Mesmo que o essencial de suas teses esteja refutado hoje, a *Física* de Aristóteles é ainda uma leitura obrigatória para quem se interessa pelo processo de construção de um edifício conceitual científico. A lamentar a ausência de uma tradução completa desta obra (“fundamental da filosofia ocidental”, nas palavras de Heidegger) em português.

Agradecimentos

Agradeço a Alice Lopes Fabris, Oliver Piatella, Felipe Tovar Falciano e Cláudia Roldi Fabris pela leitura atenta do texto e pelas importantes sugestões. Este trabalho contou com apoio financeiro parcial da FAPES e do CNPq.

Sobre o autor

Júlio C. Fabris (julio.fabris@cosmo-ufes.org) é professor titular do Departamento de Física da UFES e pesquisador do CNPq. Atualmente é o coordenador do Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação (PPG-Cosmo) e do Núcleo Cosmo-ufes. Suas atividades científicas versam sobre física teórica, com especial ênfase em cosmologia e gravitação.

Referências

- [1] Isaac Newton, *Principia - Princípios Matemáticos de Filosofia Natural* (Edusp, São Paulo, 2008).
- [2] Aristóteles, *Physique* (Flammarion, Paris, 2000).
- [3] Aristóteles, *Física, Livros I e II* (Editora da Unicamp, Campinas, 2009).
- [4] *Os Pré-socráticos, Os pensadores, Vol. 1* (Editora Abril, São Paulo, 1973).
- [5] Alexandre Koyré, *Do mundo fechado ao universo infinito* (Forense Universitária, Rio de Janeiro, 2001).
- [6] Thomas S. Kuhn, *A estrutura das revoluções científicas* (Editora Perspectiva, São Paulo, 1982).
- [7] Alexandre Koyré, *Etudes d'histoire de la pensée scientifique*, Gallimard, Paris, 1973).
- [8] São Tomás de Aquino, *Suma teológica*, in *Os pensadores, Vol. 7* (Editora Abril, São Paulo, 1973).
- [9] Dante Alighieri, *A divina comédia* (Editora 34, São Paulo, 2009).
- [10] Thomas S. Kuhn, *A revolução copernicana* (Edições 70, São Paulo, 2002).
- [11] Augustin Mansion, *Introduction à la physique aristotélicienne* (Editions de L'Institut Supérieure de Philosophie, Louvain, 1987).

De Newton a Einstein: a geometrização da gravitação

Júnior Diniz Toniato

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Discute-se de que forma se dava o entendimento da atração gravitacional na teoria de Newton e até o advento da relatividade geral de Einstein. Explica-se como o surgimento do eletromagnetismo levantou questões à física newtoniana e conduziu até a relatividade especial. Também se discute as dificuldades de se adequar a gravitação de Newton a uma formulação relativística e as diversas teorias gravitacionais que surgiram antes de Einstein apresentar sua ideia de interpretar a gravitação como um fenômeno geométrico.

Abstract

It is discussed how the understanding of gravitational attraction was given in Newton's theory and until the advent of Einstein's general relativity. It is explained how the emergence of electromagnetism raised questions to Newtonian physics and led to the theory of special relativity. It also discussed the difficulties of adapting Newton's gravitation to a relativistic formulation and the various gravitational theories that emerged before Einstein present his idea interpret gravity as a geometrical phenomenon.

Palavras-chave: Newton, Einstein, gravitação.

Keywords: Newton, Einstein, gravitation.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31666](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31666)

1 Introdução

Durante aproximadamente dois mil anos, a compreensão dos fenômenos ligados à atração gravitacional foi pautada pelas teses de Aristóteles (385 – 323 a.C.). A mudança dessa forma de pensar a gravidade iniciou-se, em grande parte, com os estudos de Galileu Galilei (1564 – 1642) sobre a natureza dos movimentos e sua defesa do método empírico em contraste com a metodologia abstrata predominante no raciocínio aristotélico.

Junto com Galileu, outros grandes cientistas da época, entre eles, Francis Bacon (1561 – 1626), Johannes Kepler (1571 – 1630) e René Descartes (1596 – 1650), ajudaram a pavimentar um caminho que, pouco depois, possibilitou que Isaac Newton (1643 – 1727) elaborasse a primeira teoria da gravitação, fundamentada no método científico e com uma profunda sistematização matemática.

A física newtoniana reinou por quase 300 anos, com larga comprovação experimental e ampla aplicação tecnológica. Somente em meados do século XIX, com o advento da teoria eletromag-

nética, que as leis de Newton começaram a ser entendidas terem aplicações limitadas, levando a uma nova revolução na física iniciada com a teoria da relatividade especial. Albert Einstein foi o protagonista dessa nova fase de redefinição de padrões na ciência. Suas ideias modificaram profundamente o entendimento da natureza, em especial a forma como entendemos a atração gravitacional, profundamente reformulada com a proposta de se entendê-la como um fenômeno geométrico, e não como uma força, conforme interpretava Newton.

Neste texto, vamos detalhar esse caminho de evolução do conhecimento científico acerca da gravitação, analisando os fundamentos da gravitação newtoniana, como o eletromagnetismo fez transparecer problemas na teoria de Newton e, por fim, de que forma Einstein reformulou a física com sua teoria da relatividade.

O artigo é organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a gravitação de Newton e a Seção 3 discute o eletromagnetismo e o princípio da relatividade. Na Seção 4 é explicado como o conceito de espaço-tempo surge naturalmente

na teoria da relatividade especial. As fórmulas matemáticas são utilizadas de forma bastante intuitiva, de modo a tornar esse texto acessível não só a estudantes de nível médio e superior mas também a qualquer leitor interessado em ciência. Entretanto, as Seções 5, 6 e 7, possuem um aprofundamento matemático maior ao discutirem as dificuldades encontradas por cientistas em reformular a gravitação newtoniana de acordo com as ideias relativísticas. O leitor não interessado em tais detalhes pode direcionar-se diretamente para a Seção 8, finalizando nossa análise com a discussão sobre como Einstein reformulou a gravitação na teoria da relatividade geral.

Espero, assim, que este texto seja acessível a diferentes públicos dos Cadernos de Astronomia, podendo ser apreciado sobre diferentes óticas, conforme o desejo do leitor.

2 A gravitação Newtoniana

No período histórico da Renascença, a redescoberta dos antigos pensadores gregos e árabes proporcionou uma profunda transformação das ideias científicas em diversas áreas do conhecimento. Na física e astronomia, um marco dessa revolução científica é o icônico trabalho de Isaac Newton, o *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*,¹ ou simplesmente, o *Principia*. Construindo as bases do cálculo matemático necessário para uma descrição teórica sucinta dos fenômenos físicos, Newton estabeleceu as leis da física que governam os movimentos de origem mecânica, suas causas e consequências. Na chamada mecânica clássica de Newton, a interação entre objetos se dá através de *Forças*, grandezas físicas que possuem intensidade, direção e sentido, sendo, portanto, representadas matematicamente através de vetores. A ação de uma força sobre um objeto produz uma aceleração na mesma direção e sentido, enquanto a intensidade depende da capacidade do objeto de resistir a esse movimento, uma propriedade de inércia natural de um corpo, definida como massa inercial. Em linguagem matemática, essa lei é expressa como,

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (1)$$

onde \vec{F} representa a força resultante que atua sobre um corpo de massa m e \vec{a} indica sua aceleração.

ção.

Somado a essa lei, ainda temos a lei da inércia, afirmando que um corpo só altera o estado de seu movimento sob a ação de uma força. Em outras palavras, um corpo em repouso tende a permanecer em repouso, a menos que atue sobre ele uma força. Por fim, a lei da ação e reação determina que uma interação entre dois objetos é recíproca, ou seja, enquanto o objeto A atua com uma força sobre um outro objeto B , este, por sua vez, também deve exercer uma força de volta sobre A . Essa força de reação possui mesma intensidade e direção mas sentido contrário.

Conhecida como segunda lei de Newton, a relação (1) é de fundamental importância pois, conhecendo-se a natureza de uma interação, obtêm-se a aceleração resultante e, com o auxílio do cálculo diferencial e integral, pode-se descrever todo o movimento consequente com as expressões da posição e velocidade em função do tempo.

Em seus trabalhos, Newton dedicou-se a estudar uma interação em particular, a gravitação, elaborando a lei de força que rege esse fenômeno. Um corpo de massa M atrai um outro corpo, de massa m , de forma proporcional ao produto de suas massas e ao inverso do quadrado da distância entre eles,

$$\vec{F}_g = G \frac{Mm}{r^2} \hat{r}, \quad (2)$$

onde \vec{F}_g representa a força gravitacional e a distância entre os dois corpos é dada pelo vetor $\vec{r} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$, sendo r o seu módulo.² A constante de proporcionalidade, G , é conhecida como constante gravitacional e seu valor é determinado empiricamente.³ Mais do que uma simples lei de força, Newton postulou que essa interação deve estar sempre presente entre corpos massivos e, dessa forma, a gravitação na superfície da Terra estende-se até os corpos celestes, governando inclusive o movimento orbital da Lua e dos planetas. Estas ideias mostraram-se bastante consistentes quando Newton também provou que sua teoria gravitacional reproduzia as leis de Kepler (1571 – 1630) do movimento planetário, já devi-

²O vetor \hat{r} é um vetor unitário na direção e sentido de \vec{r} , isto é, do centro de massa do corpo 1 para o centro de massa do corpo 2.

³A primeira medição experimental da constante gravitacional foi realizada por Henry Cavendish, em 1798, com um resultado incrivelmente próximo do valor conhecido atualmente ($6,674 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$).

¹Princípios Matemáticos da Filosofia Natural [1]

damente comprovadas por observações astronômicas. O trabalho de Kepler explicava o comportamento cinemático das órbitas celestes e Newton deu um passo a mais, elucidando que a origem desses movimentos está na força gravitacional. Mais ainda, muitos acreditavam que a natureza dos fenômenos terrestres era distinta daquela que governava os astros celestes, e Newton explicou ambos com uma única formulação teórica, levando-o a chamá-la de Teoria Universal da Gravitação.

Note que as massas utilizadas na expressão (2) são as massas inerciais de cada corpo, as mesmas utilizadas na formulação da segunda lei de Newton (1). Isso é importante para explicar um fato que já havia sido observado alguns anos antes de Newton, por Galileu (1564 – 1642). Todos os corpos são acelerados igualmente em um campo gravitacional uniforme. É o que ocorre nas proximidades da superfície da Terra, onde podemos aproximar M e r pela massa e o raio da Terra, tornando a força gravitacional uma constante, conhecida como força peso (P),

$$P = mg, \quad \text{com} \quad g = \frac{GM_T}{R_T^2}, \quad (3)$$

onde M_T e R_T são a massa e o raio da Terra e g é a chamada aceleração da gravidade na Terra. Substituindo a força peso na segunda lei de Newton (1), vemos que a aceleração produzida é sempre igual a g , independente da massa do objeto atraído para o solo, o que é condizente com os experimentos. Em outras palavras, massa inercial (resistência a qualquer movimento) e massa gravitacional (responsável por produzir atração gravitacional) são assumidas serem quantidades equivalentes. Esta igualdade é conhecida também como princípio da equivalência de Galileu.

Outro grande sucesso da gravitação Newtoniana está relacionado com a descoberta do planeta Netuno. Comportamentos inesperados na órbita de Urano podiam ser explicados como consequência da influência gravitacional de um planeta desconhecido e nunca antes observado. Usando a teoria de Newton, pôde-se calcular onde encontrar este planeta no céu e, em 1846, foi visualizado em telescópio o gigante gasoso Netuno. Pela primeira vez na história, uma previsão puramente teórica mostrava a existência de algo que escapava aos nossos olhos (e telescópios).

Entretanto, com o passar dos anos e o aumento na precisão de medidas astronômicas, a gravita-

ção Newtoniana começou a encontrar dificuldades em explicar alguns fatos. Em particular, a órbita de Mercúrio também se mostrou anômala e, sugestões de que causa poderia ser um outro planeta desconhecido, mais próximo ainda do Sol, se mostraram equivocadas. Mas a confiança na gravitação Newtoniana era tão grande que o hipotético planeta chegou até a receber um nome, Vulcano. Assim, a ideia de que a gravitação de Newton precisava ser repensada só emergiu depois que uma nova revolução reformulou as bases conceituais da física. Essa transformação começou com o eletromagnetismo de Maxwell (1831 – 1879) e se consolidou com a relatividade especial de Einstein (1879 – 1955).

3 O Eletromagnetismo e o princípio da relatividade

James Clerk Maxwell foi outro cientista que marcou a história da física. Seu mais notável trabalho foi a formulação da teoria clássica do eletromagnetismo. Em meados do século XIX, conhecia-se bem os fenômenos elétricos e magnéticos. Além disso, Faraday já havia demonstrado empiricamente a famosa lei da indução, onde um campo magnético que oscila no tempo produz um campo elétrico, é o princípio operacional dos geradores elétricos. Mas, apesar da considerável aplicação tecnológica que já tinha na época (baterias, geradores, circuitos...), todo esse conhecimento era, do ponto de vista teórico, apenas qualitativo e coube a Maxwell a formulação de uma descrição matemática desses fenômenos.

Mais do que uma formulação teórica do eletromagnetismo, Maxwell se apoiou em um dos fundamentos primordiais da ciência para introduzir em sua teoria um efeito reverso da lei da indução, ou seja, um campo elétrico variável no tempo deve produzir um campo magnético. Sem esse fenômeno, a teoria eletromagnética não estaria de acordo com o princípio da conservação, eternizado nas palavras de Lavoisier: “Na natureza nada se cria, tudo se transforma”. Mais especificamente, a correção de Maxwell garantia a conservação da carga elétrica.

O efeito recíproco da lei de indução, introduzido por Maxwell, mostra que, um campo elétrico variável no tempo produz um campo magnético também variável no tempo que, por sua vez, produz um novo campo elétrico, e assim sucessiva-

mente. O efeito é autossustentável e se propaga como uma onda. Previa-se, assim, a existência das ondas eletromagnéticas, mais tarde comprovadas com os experimentos do físico alemão Heinrich Hertz (1857 – 1894). Descobria-se que eletricidade e magnetismo eram, na verdade, duas manifestações de um mesmo fenômeno, o eletromagnetismo, sendo separáveis somente em situações estáticas. Essa talvez seja a maior unificação na física desde a gravitação universal de Newton.

Mas um ponto mais relevante para a história que queremos contar está na maneira como a teoria de Maxwell possui uma estrutura causal muito bem comportada, ao contrário da mecânica de Newton. Vamos ver essa questão à partir de uma análise qualitativa das equações destas duas teorias. O eletromagnetismo de Maxwell pode ser inteiramente descrito à partir dos chamados potencial escalar e potencial vetor, grandezas que dizem qual é o campo eletromagnético produzido por uma distribuição de cargas elétricas. Vamos nos concentrar apenas no potencial escalar φ mas as conclusões são as mesmas para o potencial vetor. Dada uma densidade de cargas ρ_e , o potencial escalar satisfaz a equação dinâmica,

$$\nabla^2\varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho_e}{\varepsilon_0}, \quad (4)$$

onde ∇^2 é o operador diferencial Laplaciano, envolvendo derivadas espaciais de segunda ordem.⁴ Em coordenadas cartesianas assume a forma,⁵

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (5)$$

A expressão (4) é uma equação de onda, o lado esquerdo contém as variações temporais e espaciais do potencial elétrico e o lado direito traz a fonte que o produz, a densidade de cargas do sistema. A constante c representa a velocidade da luz no vácuo e ε_0 , também uma constante, é a chamada permissividade elétrica no vácuo. A solução dessa equação é conhecida como potencial retardado e

⁴Para o leitor não familiarizado com o cálculo variacional, uma derivada é uma medida taxa de variação de uma certa quantidade. Por exemplo, a velocidade de um carro é uma derivada da posição em relação ao tempo e a aceleração é a derivada temporal de segunda ordem da posição. Na equação (4), leva-se em conta não só a taxa de variação temporal do campo ($\partial^2\phi/\partial t^2$) como também a maneira como ele varia no espaço tridimensional ($\nabla^2\phi$).

⁵As coordenadas x, y e z descrevem as populares dimensões largura, altura e profundidade.

recebe esse nome devido ao fato de que, para conhecermos o potencial φ , num dado instante de tempo t , é preciso saber a configuração em que se encontra a fonte ρ_e num instante anterior $t - d/c$, onde d é a distância entre a fonte e o ponto onde estamos calculando o potencial. Isso ocorre porque a informação no campo eletromagnético viaja como uma onda, com velocidade constante igual a c e, por maior que seja essa velocidade (aproximadamente 300.000 km/s no vácuo), leva-se um tempo finito para se percorrer qualquer distância, de modo que, o potencial φ sempre depende da configuração de cargas num instante anterior.

Não é só o potencial elétrico que funciona de forma temporal "retardada". Estamos frequentemente lidando com esse fenômeno no nosso dia a dia. Quando olhamos para um objeto, estamos enxergando como ele era no passado. Isso porque a luz que sai do objeto demora um tempo para chegar ao nossos olhos e formar a imagem em nosso cérebro. Esse atraso pode ser muito pequeno, quase imperceptível, mas ele existe e é consequência do fato de que a luz se propaga com velocidade finita. Estamos sempre olhando para o passado e nunca para o presente. Quanto mais distante está o objeto, mais no passado estamos olhando.

Acontece que, a gravitação Newtoniana, na sua formulação em termos de um potencial gravitacional Φ , relaciona este com a sua fonte geradora, uma densidade de massa ρ_m , à partir de uma equação ligeiramente diferente, a saber,

$$\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho_m. \quad (6)$$

Note que não há variações temporais na expressão acima. Consequentemente, a solução dessa equação não é um potencial retardado e a teoria diz que a informação no campo gravitacional deve viajar a uma velocidade infinita. Newton sabia desse problema e também se incomodava com a ação à distância da força gravitacional, mas os sucessos de sua teoria fez com que deixasse para os futuros cientistas a resolução desse impasse [2].

Um segunda contradição entre o eletromagnetismo de Maxwell e a teoria da gravitacional de Newton foi ainda mais importante na evolução do conhecimento acerca da gravitação. A física newtoniana é inteiramente construída sobre o alicerce do princípio da relatividade de Galileu: as leis da física devem ser as mesmas independente do referencial a partir do qual são observadas. Posterior-

mente, Newton refinou esse princípio com a identificação de referenciais inerciais e não-inerciais. Nos referenciais inerciais, toda aceleração detectada pode ser associada a uma força cujo agente causador é devidamente identificado (gravitação, atrito, tração e etc). O segundo tipo, os referenciais não-inerciais, ocorre quando não é possível determinar a origem de uma força para explicar uma aceleração e, conseqüentemente, as leis de Newton não se aplicam.⁶ Não é difícil concluir que os referenciais inerciais são aqueles que se movimentam com velocidade constante, uma vez que, sob a influência de um movimento não uniforme, um observador deverá associar a qualquer objeto uma aceleração sem causa aparente.

O ponto chave aqui é que, embora a física seja a mesma entre referenciais inerciais, cada referencial deve adotar seu próprio sistema de coordenadas para descrever um fenômeno observado. As relações entre as coordenadas de dois referenciais, A e B , são dadas pelas transformações de Galileu,

$$t_A = t_B = t, \quad (7)$$

$$x_A = x_B + u_{AB}t, \quad (8)$$

onde u_{AB} é a velocidade com a qual o referencial B se move em relação à A . Por simplicidade, consideramos que u_{AB} possui componente na direção x apenas e, portanto, as coordenadas y e z permanecem as mesmas em cada referencial. A equação (7) traduz a hipótese básica da relatividade de Galileu na qual o tempo é considerado absoluto, ou seja, o mesmo para qualquer referencial. Por fim, variando (8) com relação ao tempo e, sendo u_{AB} constante, obtém-se que $\vec{a}_A = \vec{a}_B$ e, segundo (1), as forças em cada sistema são as mesmas, ou seja, a física Newtoniana não muda. Em outras palavras, a mecânica de Newton é invariante sob as transformações de Galileu.

Se aplicarmos o princípio da relatividade de Galileu ao eletromagnetismo de Maxwell, a equação (4) não mais será uma equação de onda. A princípio, isso não representaria um problema pois o mesmo ocorre na física acústica, teoria que descreve o comportamento do som. As ondas sonoras são influenciadas pelo movimento do meio material em que elas se propagam e o som só satisfaz uma equação de onda no referencial em que este meio está em repouso. Poderia-se pensar que

⁶Ainda pode-se ajustar as Leis de Newton de forma a manter sua validade para alguns casos de referenciais não-inerciais através do formalismo de forças fictícias.

o mesmo valeria para a luz mas, diferente de um meio material, que é possível de se detectar de várias formas, para o eletromagnetismo deveria haver um meio especial apenas para dar suporte à propagação das ondas eletromagnéticas. Apesar do teor um tanto quanto artificial desse meio, os cientistas deram-lhe um nome, *éter*, e se esforçaram para detectá-lo experimentalmente, mas não houve resultados positivos. Restava, então, uma questão fundamental para toda a física: ou a teoria de Maxwell estava errada, ou a relatividade de Galileu era imprecisa, e, conseqüentemente, isso levaria a inconsistências na teoria newtoniana.

A teoria de Maxwell também trazia resultados bastante precisos, de modo que cientistas como Henri Poincaré (1854 – 1912) e Hendrik Lorentz (1853 – 1928) seguiram na linha da corrigir a relatividade galileana e, Albert Einstein foi quem obteve maior sucesso na descrição de como a teoria de Newton deve ser modificada.

Assumindo-se correto o eletromagnetismo maxwelliano, com a impossibilidade de se detectar o éter, vinha também a conclusão de que a velocidade da luz é uma constante, independente do referencial e da fonte que a emite.⁷ Portanto, o novo princípio da relatividade deveria ser alterado de forma que mantivesse invariante a teoria de Maxwell e respeitasse a constância da velocidade das ondas eletromagnéticas. Dessa forma, as transformações de Galileu, (7) e (8), dão lugar às transformações de Lorentz,

$$t_A = \frac{(t_B - \frac{u_{AB}}{c^2} x_B)}{\sqrt{1 - \frac{u_{AB}^2}{c^2}}}, \quad (9)$$

$$x_A = \frac{(x_B - u_{AB} t_B)}{\sqrt{1 - \frac{u_{AB}^2}{c^2}}}. \quad (10)$$

A primeira grande diferença, em relação à relatividade de Galileu, é que o tempo não é mais absoluto, ele depende do referencial tal como a coordenada espacial. Como já foi dito anteriormente, as Leis de Newton devem se adaptar a esse novo conceito de relatividade e, tal reformulação, resulta na teoria da *relatividade especial* de Einstein.⁸

⁷A velocidade da luz assume valores distintos dependendo do meio de propagação (vácuo, ar, água...). Essa propriedade que dá origem ao fenômeno da refração quando a luz muda de meio de propagação. Mas, dentro de um único meio, sua velocidade é constante.

⁸Neste mesmo número dos Cadernos de Astronomia

Mas se a mecânica clássica estava errada, como explicar os sucessos da física Newtoniana? Ocorre que, até antes da compreensão do eletromagnetismo, a ciência lidava com fenômenos que envolviam velocidades muito menores do que a velocidade da luz. Nesse limite ($u_{AB} \ll c$), as transformações de Lorentz se reduzem às transformações de Galileu, mostrando que a teoria de Newton, na verdade, possui um limite de aplicabilidade e, a baixas velocidades, ela funciona adequadamente.

4 O conceito de espaço-tempo

Na física Newtoniana, com a relatividade de Galileu (7)-(8), o espaço tridimensional euclidiano é sua representação geométrica natural. A distância entre dois pontos $r_1 = (x_1, y_1, z_1)$ e $r_2 = (x_2, y_2, z_2)$ é a mesma, independente do referencial inercial adotado. Em outras palavras, a quantidade

$$d^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2, \quad (11)$$

se mantém invariante quando aplicada as transformações de Galileu, onde $dx = x_1 - x_2$, e similar para dy e dz . A expressão anterior está escrita no sistema de coordenadas cartesiano mas é válida para qualquer sistema de coordenadas adotado. Por isso, é mais conveniente utilizarmos uma notação independente das coordenadas, escrevendo

$$d^2 = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \delta_{ij} dx^i dx^j, \quad (12)$$

com $dx^i = (dx, dy, dz)$ sendo um vetor e δ_{ij} um tensor de dois índices, conhecido como a métrica do espaço euclidiano. Tensores são generalizações dos vetores (que possuem somente um índice) que satisfazem regras específicas para transformações de coordenadas. Eles podem ser vistos como as componentes de uma matriz 3×3 . Em coordenadas cartesianas, a métrica δ_{ij} possui a forma de uma matriz identidade,

$$\delta_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

Com a relatividade restrita de Einstein, valendo as transformações de Lorentz (9)-(10), onde

apresenta-se, traduzido para o português, o artigo de Einstein que lançou a teoria da relatividade especial.

o tempo não é mais absoluto, a quantidade que permanece invariante sob a transformação de referenciais é dada por,

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2. \quad (14)$$

Em analogia com o que discutimos no parágrafo anterior, a invariância de ds sugere que a representação geométrica natural da relatividade especial é um espaço quadridimensional, onde o tempo faz o papel da quarta coordenada. Devido a isso, nomeamos essa estrutura de *espaço-tempo*. Em notação tensorial, escrevemos,

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (15)$$

Note que, agora, cada índice assume valores de 0 a 3, para incluir o tempo e $dx^\mu = (c dt, dx, dy, dz)$, com a multiplicação da coordenada temporal por c para que todas as componentes tenham unidades de comprimento. A métrica passa a ser representada por $\eta_{\mu\nu}$ e recebe o nome de métrica de Minkowski (1864 – 1909), em homenagem ao matemático que primeiro utilizou essa descrição geométrica da relatividade especial. Em coordenadas cartesianas ela assume a forma de uma matriz identidade 4×4 mas com um sinal negativo na componente temporal,

$$\eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Na relatividade especial, cada referencial pode medir as dimensões de um objeto e sua velocidade, tudo em relação às suas coordenadas espaciais e temporal. Esses valores mudam de referencial para referencial, dando origem aos fenômenos da *dilatação temporal* e *contração espacial*. Quanto mais rápido se move um observador mais lentamente passa o tempo para ele, ao passo que as distâncias que ele mede ficam menores. Mas a quantidade ds é invariante e define o que chamamos de *comprimento próprio*, uma medida de distância que independe do referencial e seu movimento. Uma vez que a velocidade da luz é também uma constante universal na relatividade especial, é possível definir uma variação de tempo também independente de referencial, o *tempo próprio*, dado por $d\tau = ds/c$, que será

muito importante na construção de grandezas cinemáticas, como a velocidade.

A teoria da relatividade especial revolucionou a física no início do século XX, evidenciando a natureza como nunca havíamos pensado e mostrando que a física Newtoniana é apenas uma aproximação de uma formulação mais complexa. Entretanto, o termo “especial” atenta para o fato de que a teoria possui aplicação restrita,⁹ válida somente para os casos de movimentos uniformes. A generalização da relatividade especial só foi possível após uma extensa discussão acerca do princípio da equivalência e engloba a natureza da gravidade. Vamos discutir a seguir como se deu a evolução dessas ideias até a formulação da teoria da relatividade geral.

5 Generalização da gravitação newtoniana

Nos anos que se seguiram a apresentação da teoria da relatividade especial, não se imaginava encontrar uma maior dificuldade para adaptar a gravitação newtoniana aos conceitos revolucionários que a teoria de Einstein trazia. Uma das questões-chaves estava na equação satisfeita pelo campo gravitacional Newtoniano, equação (6), e a ação à distância instantânea que ela implica, violando o postulado da relatividade especial de que nada se propaga mais rápido que a velocidade da luz. A solução desta incompatibilidade mostrou-se mais complexa do que se esperava.

Em 1907, Einstein registrou as suas primeiras especulações acerca da possibilidade de estender sua teoria da relatividade especial a movimentos acelerados [3]. Sua descrição é simples e suas ideias sobre o tema podem ser reconstruídas facilmente [4]. A proposta naturalmente surge com uma generalização da força Newtoniana ao formalismo quadridimensional da relatividade restrita,

$$F^\mu = \frac{d}{d\tau} \left(m \frac{dx^\mu}{d\tau} \right), \quad (17)$$

onde m é a massa do objeto que sofre ação da força F^μ , e x^μ indica a sua posição no espaço-tempo. Note que as variações temporais são tomadas em relação ao tempo próprio. Esta definição é feita no espaço-tempo de Minkowski, onde

⁹Relatividade restrita é também um sinônimo pra relatividade especial.

a constância da velocidade da luz implica na condição de normalização da quadri-velocidade,

$$\eta_{\mu\nu} \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = c^2. \quad (18)$$

Na expressão acima, estamos fazendo uso da notação de Einstein e índices repetidos implicam que os mesmos estão sendo somados sobre todos os valores que possam assumir. Há, portanto, uma soma dupla em μ e ν , tal como na expressão (15). Na verdade, a condição acima é obtida dividindo (15) por $d\tau^2$.

Além disso, a constância da massa m , implica

$$\eta_{\mu\nu} F^\mu \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0. \quad (19)$$

No caso gravitacional, podemos definir uma quadri-força F_g^μ , nos moldes como define-se a força gravitacional Newtoniana, a partir do gradiente do potencial gravitacional Φ ,

$$\vec{F}_g = m \vec{\nabla} \Phi. \quad (20)$$

No domínio da relatividade restrita generalizamos essa definição como

$$F_g^\mu = mc^2 \eta^{\mu\nu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\nu}. \quad (21)$$

O termo c^2 é inserido para que Φ passe a ser adimensional. No entanto, o campo gravitacional deve satisfazer uma equação dinâmica que seja invariante segundo as transformações de Lorentz. Para isso, o mais simples seria o potencial gravitacional satisfazer uma equação de onda como o potencial escalar do eletromagnetismo, ou seja

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Phi = \frac{4\pi G}{c^2} \rho_m, \quad (22)$$

Mas a condição (19), juntamente com a força gravitacional definida em (21), implicam que,

$$\frac{d\Phi}{d\tau} = 0. \quad (23)$$

Em outras palavras, o potencial gravitacional deve permanecer constante ao longo da trajetória de uma partícula, ou seja, a força gravitacional deve ser nula na partícula. Uma análise um pouco mais detalhada mostra que, uma teoria como a proposta acima, falha em cumprir o princípio de equivalência de Galileu, que deve permanecer inalterado. Essa inconsistência física levou Einstein a abandonar a formulação de uma

teoria da gravitação invariante de Lorentz e o fez repensar o princípio de equivalência para estabelecer as relações entre um campo gravitacional e uma aceleração correspondente [5]. A afirmação Galileana de que, na ausência de forças externas, todos os corpos caem com a mesma aceleração (igualdade entre as massas inercial e gravitacional), foi então reformulada por Einstein no que hoje conhecemos como o princípio de equivalência forte, tornando-se uma hipótese heurística necessária para a elaboração do que viria a ser a teoria relatividade geral.

O princípio de equivalência forte assegura que não é possível distinguirmos entre um referencial acelerado uniformemente e um outro sob a influência de um campo gravitacional homogêneo e estático. É a essência do famoso experimento mental do foguete parado na superfície da Terra ou sendo acelerado com intensidade g . Uma pessoa no interior desse foguete, sem contato visual com o exterior, não poderia distinguir entre uma situação ou outra.

Mas antes que ele voltasse a publicar sobre o assunto, o físico finlandês Gunnar Nordström (1881–1923) propôs algumas variações nessa formulação para escapar dos problemas acima citados.

6 As teorias gravitacionais de Nordström

Buscando contornar o problema da adaptação da gravitação newtoniana à relatividade restrita, Nordström primeiramente manteve a generalização da equação dinâmica do campo gravitacional (22), como proposta por Einstein. Todavia, sua contribuição relevante veio no tratamento da quadriforça. Propôs que a massa de um corpo dependesse do campo gravitacional. As equações (17) e (21) dão origem à expressão

$$m \frac{dv_\mu}{d\tau} + v_\mu \frac{dm}{d\tau} = mc^2 \frac{\partial \Phi}{\partial x^\mu}, \quad (24)$$

e o termo de derivada da massa impede o surgimento da condição (23). Contrariamente, a contração dessa última expressão com v^μ nos leva a uma equação diferencial facilmente integrável que indica a dependência da massa com o campo gravitacional, a saber

$$m(\Phi) = M_0 e^\Phi, \quad (25)$$

com M_0 sendo uma constante de integração. Usando este resultado na equação (24), obtém-se a equação de movimento para uma partícula teste,

$$c^2 \frac{\partial \Phi}{\partial x^\mu} = \frac{dv_\mu}{d\tau} + v_\mu \frac{d\Phi}{d\tau}. \quad (26)$$

Nordström afirmava que a equação dinâmica de sua teoria, sendo independente da massa, era um reflexo da igualdade entre as massas gravitacional e inercial. A aceleração de diferentes partículas em um campo gravitacional não depende de suas respectivas massas, implicando que a teoria contém o princípio de equivalência de Galileu. Porém, essa teoria possui problemas ao descrever o movimento de uma partícula teste em queda livre, por exemplo. Considere um campo gravitacional estático, $\partial \Phi / \partial t = 0$, e assuma que este campo atue somente no sentido da queda da partícula, por exemplo $\Phi = \Phi(z)$. As equações (26) são escritas como

$$\frac{dv_\mu}{d\tau} = -v_\mu \frac{d\Phi}{d\tau}, \quad \mu \neq 3, \quad (27)$$

$$c^2 \frac{d\Phi}{dz} = \frac{dv_3}{d\tau} + v_3 \frac{d\Phi}{d\tau}. \quad (28)$$

Escrevendo as velocidades da partícula em termos do tempo local t , teremos

$$v_0 = c \frac{dt}{d\tau}, \quad v_i = \frac{v_0}{c} V_i, \quad \text{com } V_i \equiv \frac{dx^i}{dt}. \quad (29)$$

Substituindo isso nas equações de movimento, verifica-se que

$$\frac{dV_z}{dt} = -c^2 \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right) \frac{d\Phi}{dz}, \quad (30)$$

$$\frac{dV_x}{dt} = 0, \quad \frac{dV_y}{dt} = 0. \quad (31)$$

onde definimos $V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2$. Esse resultado diz que corpos que possuam velocidades horizontais caem mais lentamente que aqueles que não as possuam, ou seja, corpos girantes em queda livre serão acelerados mais lentamente que os não girantes [6].

Outra questão problemática está relacionada com a determinação da fonte do campo gravitacional. A densidade de massa, como se sabe, é dada em termos da projeção do tensor de energia e momento $T_{\mu\nu}$, na direção do observador que se move com velocidade v^μ ,

$$\rho_m = T_{\mu\nu} v^\mu v^\nu. \quad (32)$$

O tensor de energia e momento descreve a densidade e o fluxo de energia e momento no espaço-tempo. É uma generalização relativística do tensor de tensões da física Newtoniana. Utilizar este parâmetro ρ_m como a fonte do campo gravitacional resulta em uma dinâmica do campo que implicitamente depende do sistema de referência adotado. Einstein, então, sugeriu que a única quantidade escalar que poderia ser fonte do campo gravitacional era o traço do tensor de energia-momento da matéria,

$$T = T_{\mu\nu} \eta^{\mu\nu}. \quad (33)$$

Isso levou Nordström à formulação de uma segunda teoria gravitacional, no qual acatava as críticas de Einstein.

6.1 Segunda teoria de Nordström

Como dito na seção anterior, em sua segunda teoria gravitacional, Nordström modifica a fonte do campo escalar da densidade de energia ρ para o traço do tensor de energia-momento, T . Isso implica em considerar que, assim como o campo eletromagnético, o campo gravitacional deve carregar uma certa energia, o que leva a uma não linearidade na teoria (já que a relatividade especial afirma que qualquer forma de energia é equivalente à uma massa e, portanto, deve gerar um campo gravitacional). Nordström incluiu essa não linearidade através da adição de um fator gravitacional na fonte do campo,

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Phi = -\frac{4\pi G}{c^4} \frac{T}{\Phi}, \quad (34)$$

e também na força gravitacional (21),

$$F_g^\mu = \frac{mc^2}{\Phi} \eta^{\mu\nu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\nu}. \quad (35)$$

Novamente estamos trabalhando com uma formulação onde o campo escalar é adimensional.

A equação de movimento resultante dessa modificação é tal que

$$c^2 \frac{\partial \Phi}{\partial x^\mu} = \Phi \frac{dv_\mu}{d\tau} + v_\mu \frac{d\Phi}{d\tau}, \quad (36)$$

com a dependência da massa sendo agora dada de forma linear,

$$M(\Phi) = M_0 \Phi. \quad (37)$$

Para analisarmos a conservação da energia, fica mais fácil utilizarmos a maneira pelo qual Einstein apresentou esta teoria de Nordström em 1913 [7]. O tensor de energia-momento da matéria em um sistema fechado é tal que,

$$T^{\mu\nu} = \rho \Phi v^\mu v^\nu. \quad (38)$$

Já a contribuição do próprio campo gravitacional será dado por,

$$t^{\mu\nu} = \frac{c^4}{4\pi G} \eta^{\mu\alpha} \eta^{\nu\beta} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x^\alpha} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\beta} - \frac{w}{2} \eta_{\alpha\beta} \right), \quad (39)$$

com,

$$w \equiv \eta^{\mu\nu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\mu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\nu}. \quad (40)$$

Sob essas definições, o tensor de energia-momento total, $T^{\mu\nu} + t^{\mu\nu}$, se conservará. Basta ver que,

$$\frac{\partial t^{\mu\nu}}{\partial x^\nu} = -\frac{T}{\Phi} \eta^{\mu\nu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\nu}, \quad (41)$$

onde utilizamos a equação (34) e,

$$\frac{\partial T^{\mu\nu}}{\partial x^\nu} = \frac{T}{\Phi} \eta^{\mu\nu} \frac{\partial \Phi}{\partial x^\nu}, \quad (42)$$

considerando-se a conservação da massa, expressa como,

$$\frac{\partial}{\partial x^\mu} (\rho v^\mu) = 0. \quad (43)$$

Portanto, a divergência do tensor de energia-momento total é nula, garantindo a conservação da energia.

Essa teoria chamou a atenção de Einstein, que a qualificou como a única teoria gravitacional satisfatória até aquele momento. Tanto que pouco tempo depois, publicou uma reformulação geométrica para ela como veremos a seguir.

6.2 Reformulação de Einstein-Fokker

Em 1914, Einstein e seu aluno, Adriaan Fokker (1887 – 1972), publicaram um trabalho no qual aplicam a teoria matemática do cálculo diferencial aos últimos resultados de Nordström [8]. Mostra-se então que a equação de movimento (36) consiste em uma geodésica em um espaço-tempo descrito pela métrica

$$g_{\mu\nu} = \Phi^2 \eta_{\mu\nu}. \quad (44)$$

A métrica de Minkowski define um espaço-tempo cuja geometria é plana, tal como o espaço tridimensional euclidiano. Já uma métrica como $g_{\mu\nu}$

descreve um espaço-tempo de geometria curva. Uma geodésica é a menor distância entre dois pontos e, em um espaço plano, ela se reduz a uma reta. Portanto, nessa formulação de Einstein e Fokker, os efeitos da gravitação são descritos como consequência de uma geometria curva, que altera o caminho seguido por partículas testes.

Em geometrias curvas, uma quantidade muito importante para a descrição da curvatura do espaço-tempo é o tensor de Ricci, $R_{\mu\nu}$, calculado à partir de derivadas segundas da métrica. O seu traço, $R = R_{\mu\nu}g^{\mu\nu}$, é conhecido como *escalar de curvatura* e, para a métrica (44) ele é dado por,

$$R = -\frac{6}{\Phi^3} \left(\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Phi \right). \quad (45)$$

Como a métrica $g_{\mu\nu}$ nada mais é que uma transformação conforme de $\eta_{\mu\nu}$, o tensor de energia-momento se transforma como

$$T(\eta_{\mu\nu}) \rightarrow \frac{T(g_{\mu\nu})}{\Phi^4}. \quad (46)$$

Assim, facilmente vemos que a equação dinâmica (34) pode ser reescrita como

$$R = \frac{24\pi G}{c^4} T. \quad (47)$$

Novamente, essa formulação descreve o campo gravitacional em termos de variáveis geométricas. Assim, o princípio de equivalência forte está garantido, pois todo corpo teste sentirá os mesmos efeitos da gravitação, uma vez que ela está contida na geometria do espaço-tempo. Um ponto interessante é que a massa não precisa mais ser dependente do campo escalar.

Embora esta teoria escalar da gravitação tenha sido bem aceita, hoje podemos evidenciar problemas que à época não eram tão claros ou careciam de evidências experimentais para confirmá-los. Por um lado, a teoria de Nordström satisfaz os princípios básicos de equivalência, conservação da energia e possui um correto limite para a gravitação Newtoniana. Por outro lado, ao utilizar o traço do tensor de energia-momento como fonte do campo gravitacional, não se acopla o eletromagnetismo à gravitação, isso porque, para o electromagnetismo, $T = 0$. Além disso, não podemos interpretar a equação (47) de forma plena devido à restrição existente na definição da geometria do espaço-tempo. Essa

equação só se reduz à teoria de Nordström no caso de um sistema de coordenadas conformalmente Cartesiano. Na métrica (44), somente o fator conforme tem uma dinâmica devidamente determinada pelo conteúdo material de um sistema, ou seja, sua estrutura não pode ser mudada apenas modificando-se a distribuição de matéria desse sistema.

Ainda assim, a teoria de Nordström desempenhou um papel importantíssimo para Einstein na sua busca pela teoria geral da relatividade, mostrando-o todo o potencial do ferramental matemático do cálculo diferencial e indicando o caminho a ser seguido.

7 A proposta de Einstein

Einstein publicou em 1913 um famoso artigo em conjunto com seu amigo matemático Marcel Grossmann (1878 – 1936). O trabalho, conhecido como *Entwurf* (esboço), generaliza a ideia contida na formulação de Einstein-Fokker e descreve o campo gravitacional como um tensor de dois índices arbitrário [9]. Foram os indícios provenientes de suas tentativas passadas, para formular uma teoria para um campo gravitacional estático [10], que levou a essa significativa modificação na representação do potencial gravitacional.

A relatividade especial, faz uma generalização do princípio de inércia Newtoniano ao descrever a trajetória de partículas livres segundo geodésicas no espaço quadridimensional de Minkowski. Isso nada mais é do que o princípio de Hamilton da mínima ação, a dinâmica de uma partícula teste é obtida a partir do princípio variacional,

$$\delta \int ds = \delta \int \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2} = 0. \quad (48)$$

Utilizando os avanços do cálculo diferencial da época, Einstein propõe que na presença de um campo gravitacional a métrica plana de Minkowski deve ser substituída por uma estrutura mais geral. O comprimento próprio é então redefinido como,

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (49)$$

Partículas livres seguirão geodésicas na métrica $g_{\mu\nu}$ e o campo gravitacional será representado por suas dez componentes [11].¹⁰

¹⁰O tensor $g_{\mu\nu}$ é simétrico, ou seja, $g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$, e só há 10 componentes independentes.

Essa interpretação dos fenômenos gravitacionais abdica do conceito de força da mecânica Newtoniana (e também da ideia inicial de Nordström) para entender a gravitação como uma manifestação da geometria do espaço-tempo. Contudo, assim como na gravitação Newtoniana, o princípio da mínima ação apenas determina o movimento de uma partícula teste sujeita ao campo gravitacional. Era preciso ainda estabelecer as equações dinâmicas para $g_{\mu\nu}$.

A equação do campo gravitacional (6) continuou sendo uma espécie de inspiração na busca pela dinâmica da gravitação. O lado esquerdo deveria conter uma combinação da métrica $g_{\mu\nu}$, suas primeiras e segundas derivadas. O lado direito traria a fonte do campo que, àquela época já se entendia que deveria ser o tensor de energia-momento $T_{\mu\nu}$. Além disso, a equação resultante deveria ser de tal forma que a teoria final fosse uma verdadeira generalização da teoria da relatividade especial e, assim, todos os sistemas de referências seriam equivalentes entre si. Em outras palavras, a equação dinâmica deveria ser covariante. Entretanto, no artigo *Entwurf*, Grossmann mostrou que o tensor de Ricci, $R_{\mu\nu}$, seria a única quantidade covariante que poderia ser construída com a métrica e suas duas primeiras derivadas, mas ambos os cientistas, equivocadamente, acreditaram que a equação de campo construída com $R_{\mu\nu}$ falhava em obter o limite Newtoniano para campos fracos. Isso chegou a levar Einstein a abrir mão da covariância geral da teoria [12].

Somente após o trabalho feito junto com Fokker, aplicando o cálculo tensorial à segunda teoria de Nordström, foi que Einstein voltou a acreditar que o tensor de Ricci poderia sim ter um papel fundamental na derivação de uma equação dinâmica covariante para o campo $g_{\mu\nu}$ condizente com o limite Newtoniano, já que a equação (47), construída com o escalar de Ricci, corretamente fornece esse limite. A busca por uma teoria da gravitação, sob o conceito geométrico representado pelo tensor métrico $g_{\mu\nu}$, que fosse completamente covariante, teve seu desfecho, como bem sabemos, com a formulação da equação de campo de Einstein,

$$R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}. \quad (50)$$

Para uma discussão mais detalhada desse processo veja as referências [13–15].

8 A geometrização da gravitação

Recapitulando as últimas sessões, Einstein observou que a gravitação Newtoniana não possui uma generalização imediata para se adequar ao princípio da relatividade de Lorentz. A solução dessa questão passava por repensar o princípio de equivalência de Galileu, que Einstein reformulou através do experimento mental do foguete. Uma pessoa dentro de um foguete, sem contato visual com o exterior, não pode distinguir entre as duas situações a seguir: i) está parado na superfície da Terra ou ii) está em movimento com aceleração igual ao do campo gravitacional da Terra. Em outras palavras, não há distinção entre movimento inercial (foguete acelerado) e movimento sobre influência da gravitação (foguete parado).

A ideia de Einstein para solucionar o problema da gravitação é ampliar o conceito de movimento inercial de forma a incluir a atração gravitacional nele. A forma com a qual ele conseguiu esta proeza baseia-se na interpretação geométrica introduzida por Minkowski à teoria da relatividade especial. O movimento de uma partícula livre (sem atuação de forças) é uma geodésica, uma curva determinada pela estrutura geométrica do espaço-tempo. Em coordenadas cartesianas, essa curva se reduz a uma reta, mas este não é sempre o caso. Isso é semelhante ao que acontece quando traçamos a menor distância entre dois pontos em um mapa-múndi. Em uma versão plana do mapa obtém-se uma reta. Mas em uma versão do tipo globo a menor distância entre dois pontos não será uma reta, pelo simples fato de que a trajetória tem de acompanhar a superfície curva do globo.

Einstein, portanto, assume que essa propriedade deve continuar valendo quando a gravidade se faz presente, ou seja, partículas livres devem continuar seguindo geodésicas no espaço-tempo. Mas essa geodésica não pode ser equivalente àquela sem a presença de um campo gravitacional e, sua modificação não pode estar associada com o sistema de coordenadas que se adota (o exemplo anterior do mapa plano e do globo é um analogia de como a forma de uma geodésica muda de acordo com as coordenadas adotadas). Resta a opção de se modificar a geometria do espaço tempo. Dessa forma, a teoria da relatividade geral, inclui a gravitação como uma forma de movimento inercial e, em consequência, deixa de interpretar essa interação como um força, passando

a vê-la como uma consequência da curvatura do espaço-tempo.

A fonte do campo gravitacional é toda forma de massa e energia, seguindo as ideias da relatividade especial. Portanto, matéria/energia curva o espaço-tempo que, por sua vez, influencia no movimento da matéria/energia, que altera a estrutura do espaço-tempo... e assim por diante. O leitor atento, observará que esse é um processo análogo ao da criação de ondas eletromagnéticas na teoria de Maxwell. Não por acaso que, poucos anos depois da formulação da teoria da relatividade geral (1915), o próprio Einstein demonstrou que ondas gravitacionais devem existir, uma previsão que se mostrou verdadeira quase 100 anos depois.

Obviamente, a relatividade geral encontrou confirmação experimental muito antes disso. Já em seu primeiro trabalho, Einstein provou que as anomalias na órbita de Mercúrio, antes um problema inexplicado na gravitação newtoniana, eram naturalmente previstas em sua teoria. A teoria de Newton prevê que a órbita de planetas é uma elipse, mas a relatividade geral, com sua inovadora descrição da gravitação como geometria, prevê que essas elipses podem girar no espaço, como ilustrado na Figura 1. Esse fenômeno é hoje conhecido como o *avanço do periélio orbital* e é mais acentuado na órbita de Mercúrio. Levando em conta esse efeito, as previsões teóricas concordam satisfatoriamente com as observações astronômicas.

Posteriormente, outros testes fortaleceram e estabeleceram a teoria da relatividade geral como a formulação padrão para a descrição dos fenômenos gravitacionais. Esse caminho de consolidação da teoria de Einstein é o que se discute no seguinte artigo dessa série de textos A Gravitação.

Agradecimentos

J.D. Toniato agradece à FAPES e CAPES pelo apoio financeiro através do programa Profix.

Sobre o autor

Junior Diniz Toniato (junior.toniato@ufes.br) é doutor em física pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), Rio de Janeiro - RJ, tendo recebido dessa instituição o prêmio de melhor

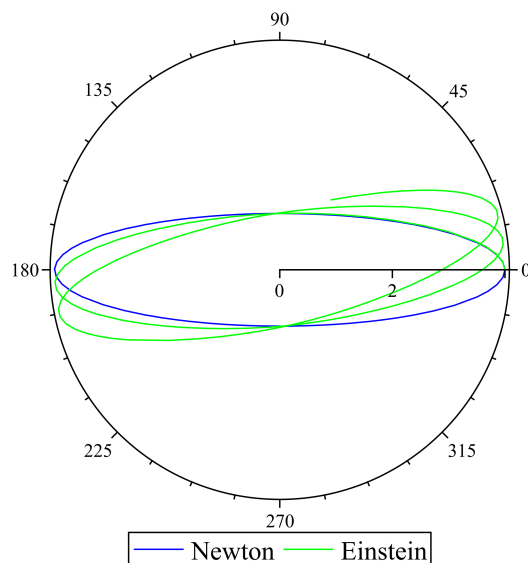


Figura 1: Simulação computacional do fenômeno do avanço do periélio orbital, comparando as previsões da relatividade geral e da gravitação newtoniana (Fonte: Ref. [16]).

tese de doutorado em 2014. Já lecionou como professor substituto na UFES e atualmente é pós-doutorando no PPGCosmo/UFES, desenvolvendo pesquisas na área de gravitação e cosmologia com especial enfoque a teorias alternativas e testes gravitacionais.

Referências

- [1] I. Newton, *Principia: princípios matemáticos de filosofia natural* (EDUSP, São Paulo, 2008).
- [2] A. Janiak (ed.), *Newton: Philosophical Writings*, Cambridge Texts in the History of Philosophy (Cambridge University Press, 2014), 2 ed.
- [3] A. Einstein, *On the relativity principle and the conclusions drawn from it*, in *The collected papers of Albert Einstein. Vol. 2: The swiss years: Writings, 1900-1909 (English translation)*, editado por A. Beck e P. Havas (Princeton University Press, Princeton, 1987), 252–311.
- [4] C. H. Brans, *Gravity and the tenacious scalar field*, in *Symposium to honor Engelbert Schucking* (1996).

- [5] J. D. Norton, *Einstein, nordström and the early demise of scalar, lorentz-covariant theories of gravitation*, *Archive for History of Exact Sciences* **45** (1), 17–94 (1992).
- [6] J. D. Norton, *Einstein and Nordström: Some Lesser Known Thought Experiments in Gravitation*, in *The Attraction of Gravitation: New Studies in History of General Relativity*, editado por J. Earman, M. Janssen e J. D. Norton (Birkhäuser, Boston, 1993), vol. 5 de *Einstein Studies*, 3–29.
- [7] A. Einstein, *On the present state of the problem of gravitation*, in *The collected papers of Albert Einstein. Vol. 4: The swiss years: Writings 1912-1914 (English translation)*, editado por A. Beck e P. Havas (Princeton University Press, Princeton, 1996), vol. 4, 198–222.
- [8] A. Einstein e A. D. Fokker, *Nordström's theory of gravitation from the point of view of the absolute differential calculus*, in *The collected papers of Albert Einstein. Vol. 4: The swiss years: Writings 1912-1914 (English translation)*, editado por A. Beck e P. Havas (Princeton University Press, Princeton, 1996), vol. 4, 293–299.
- [9] A. Einstein e M. Grossmann, *Outline of a generalized theory of relativity and of a theory of gravitation*, in *The collected papers of Albert Einstein. Vol. 4: The swiss years: Writings 1912-1914 (English translation)*, editado por A. Beck e D. Howard (Princeton University Press, Princeton, N. J., 1996), 151–188.
- [10] A. Einstein, *On the theory of the static gravitational field and note added in proof*, in *The collected papers of Albert Einstein. Vol. 4: The swiss years: Writings, 1912-1914 (English translation)*, editado por A. Beck e D. Howard (Princeton University Press, Princeton, 1996), 107–120.
- [11] D. Lehmkuhl, *Why einstein did not believe that general relativity geometrizes gravity*, *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics* **46**, 316 – 326 (2014).
- [12] J. Stachel, *Einstein's search for general covariance, 1912 - 1915.*, in *Einstein and the History of General Relativity*, editado por D. Howard e J. Stachel (Birkhäuser, 1989), vol. 1 de *Einstein Studies*, 63–100.
- [13] J. Renn e T. Sauer, *Pathways out of classical physics*, in *The Genesis of General Relativity*, editado por M. Janssen, J. D. Norton, J. Renn, T. Sauer e J. Stachel (Springer Netherlands, Dordrecht, 2007), 113–312.
- [14] J. D. Norton, *How Einstein found his field equation, 1912-1915*, in *Einstein and the History of General Relativity*, editado por D. Howard e J. Stachel (Birkhäuser, Boston, 1989), vol. 1 de *Einstein Studies*, 101–159.
- [15] M. Janssen e J. Renn, *Untying the knot: how einstein found his way back to field equations discarded in the zurich notebook*, in *The Genesis of General Relativity*, editado por M. Janssen, J. D. Norton, J. Renn, T. Sauer e J. Stachel (Springer Netherlands, Dordrecht, 2007), 839–925.
- [16] T. Ribeiro, *Scalar gravitation: inconsistency of planetary orbits*, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **38**(4), e4313 (2016).

Introdução à relatividade geral

Oliver F. Piattella

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Apresentamos aqui uma breve e não-técnica introdução à teoria da relatividade geral, começando pelo conceito de espaço-tempo, passando pelo princípio de equivalência, e chegando nos testes clássicos que consagraram a teoria como uma das mais bonitas e bem-sucedidas da física.

Abstract

We present here a brief and non-technical introduction to the theory of general relativity, starting from the concept of spacetime, passing through the equivalence principle and ending with the classical tests which made the theory one of the most beautiful and successful of physics.

Palavras-chave: relatividade geral, espaço-tempo, princípio de equivalência, testes clássicos da relatividade geral.

Keywords: general relativity, spacetime, equivalence principle, classical tests of general relativity.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.30827)

1 Introdução

O objetivo desta contribuição ao primeiro número dos Cadernos de Astronomia é o de dar uma introdução à teoria da relatividade geral (daqui para frente abreviada por RG), formulada por Albert Einstein (1879–1955) em 1915 [1].¹ Existem na literatura vários livros-texto que podem fornecer uma introdução adequada à RG como por exemplo [3–5].

Estruturando este artigo de maneira que seja compreensível, é necessário que algum conceito básico já esteja em posse do leitor. Felizmente, as demais contribuições presentes neste número dos Cadernos de Astronomia contribuem para este conhecimento prévio necessário para a compreensão da RG. Começamos pelo conceito de força gravitacional e a sua descrição através da Lei de Gravitação Universal formulada por Isaac Newton (1643–1727) [6]. Existe uma interação entre dois corpos quaisquer, proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao

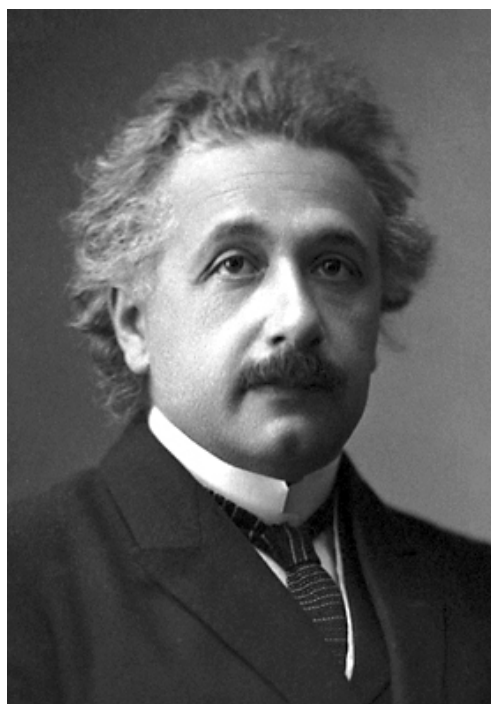


Figura 1: Albert Einstein (1879–1955) fotografado na ocasião do prêmio Nobel que ele recebeu em 1921. (Fonte: Wikipédia)

¹É importante ressaltar que a RG não foi desenvolvida por Einstein num único artigo, o citado [1], mas em muitos trabalhos que podemos considerar começando com o importante artigo [2] de 1905, o *annus mirabilis* do Einstein, em que ele propõe a teoria da relatividade restrita.

quadrado da distância entre eles. Em fórmulas matemáticas, a força gravitacional \mathbf{F} agindo entre duas massas puntiformes, m_1 e m_2 , separadas por uma distância r é a seguinte,²

$$\mathbf{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{\mathbf{r}}_{12}, \quad (1)$$

onde G é uma constante (a constante de gravitação), $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ é um *versor*, um vetor com comprimento unitário que serve para indicar que a direção da força é a da reta que passa pelas duas massas puntiformes, e o sinal negativo indica que a força gravitacional é sempre atrativa (diferentemente da força elétrica, por exemplo, que pode ser também repulsiva).

Como mencionado, esta força instaura-se entre massas puntiformes. Então não parece ser muito útil para estudar, por exemplo, mecânica celeste, ou seja, o movimento dos planetas e dos corpos astronômicos em geral, que definitivamente não são puntiformes. A utilidade da Lei (1) se manifesta graças ao *princípio de superposição*, segundo o qual os campos gravitacionais gerados por várias massas se somam. Isto é sugerido também pelo fato que a Lei (1) está escrita em forma vetorial, e sabemos como somar vetores. Portanto, para calcular o campo gravitacional gerado, por exemplo, pelo Sol em um dado ponto do espaço o que se faz é calcular o campo gerado por cada “pedacinho” de Sol neste dado ponto e somar todas as contribuições. Matematicamente, estamos fazendo *cálculo infinitesimal* (chamado somente de *cálculo* hoje em dia nas universidades) e, especificamente, fazendo uma *integral*. Incidentalmente, o Newton não deu somente uma contribuição enorme para a física, mas também para a Matemática, pois ele desenvolveu, segundo alguns até inventou, juntamente ao Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), o cálculo infinitesimal.

Para terminarmos esta pequena introdução, é necessário ressaltar também o fato de que a Lei (1) descreve uma interação que ocorre a *distância*, ou seja qualquer mudança sofrida por exemplo pela massa m_1 é transmitida (e “sentida”) instantaneamente para a massa m_2 .

Podemos antecipar que esta transmissão instantânea da interação é rejeitada na RG, pois nada pode-se propagar com velocidade superior à velocidade da luz. Além disso o princípio de

superposição não é mais válido, tornando a RG uma teoria “difícil” e, em última análise, aparentemente impossível de se harmonizar com a teoria quântica, outro grande sucesso da física. Enfim, na RG o conceito de força gravitacional não existe mais e é substituído pelo efeito dos corpos materiais que se movimentam num espaço-tempo cuja geometria não é Euclidiana, ou seja, não é planar, mas possui curvatura.

Para sermos mais específicos sobre este último ponto, vamos revisar agora o conceito de espaço-tempo.

2 O espaço-tempo

Antes de enfrentarmos o tópico principal do artigo, a RG, precisamos fazer um primeiro passo na teoria da relatividade restrita (daqui para frente abreviada por RR), formulada também por Albert Einstein em 1905 [2] e que leva ao conceito de espaço-tempo. Este foi introduzido por Hermann Minkowski (1864-1909), e então chamado às vezes *espaço de Minkowski*, quando refere-se à representação geométrica da RR. O espaço de Minkowski é um espaço plano, com quatro dimensões e onde as distâncias se calculam de uma forma mais esquisita da que estamos acostumados no espaço tridimensional. A RR já foi discutida em outro artigo deste número dos Cadernos de Astronomia, portanto não entrarei em muito detalhe, porém voltarei à questão de como calcular as distâncias no espaço de Minkowski no final desta seção.

O (provavelmente) maior sucesso da física do século XIX é representado pela compreensão dos fenômenos elétricos e dos fenômenos magnéticos, aparentemente pertencentes a mundos distintos, mas na verdade faces da mesma moeda, que hoje se chama *eletromagnetismo*. O cume deste sucesso é, pelo menos do ponto de vista teórico, representado pelas *equações de Maxwell*, elaboradas pelo físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) em [7] e que escrevo aqui,

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c} \left(4\pi\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right). \quad (5)$$

²Este artigo contém fórmulas matemáticas, mas pode ser lido também desconsiderando-as. Elas estão a disposição dos leitores mais curiosos.

Não vou explicar em detalhe estas equações, pois são bem mais complicadas que a Lei (1) e envolvem um certo conhecimento matemático de cálculo diferencial vetorial, que não é necessário aqui pois a minha intenção é apenas de mostrar a “cara” destas equações muito famosas. Só basta notar que \mathbf{E} é o chamado *campo elétrico*, \mathbf{B} o *campo magnético* e c é a velocidade da luz no vácuo.³ Reparem também na simetria destas equações, quebrada apenas pelas quantidades ρ e \mathbf{J} , que são a *densidade de carga elétrica* e a *densidade de corrente elétrica*, respectivamente. De fato, colocando estas duas quantidades a zero e combinando oportunamente as equações acima descobre-se que os campos elétricos e magnéticos propagam-se como ondas, as famosas *ondas eletromagnéticas*, das quais a luz que vemos com os nossos olhos é um exemplo.

Com as equações de Maxwell o domínio intelectual do homem sobre a natureza se estendia um pouco mais, além dos fenômenos mecânicos, abrangendo também os elétricos e magnéticos, que tinham fascinado o ser humano desde os tempos antigos. Não se tratava porém de um domínio completo, pois não se conhecia ainda a estrutura da matéria, os átomos e seus núcleos, e ninguém tinha ainda ideia da existência das interações fracas e fortes, relacionadas justamente ao âmbito da física nuclear. A disciplina da química existia sim, mas não tinha ainda relação com a física, sendo uma ciência bem distinta. Hoje sabemos que as leis fundamentais que estão na base da química são leis da física, em específico leis do eletromagnetismo e da física quântica.

Como mencionado, o outro âmbito da física, que no século XIX já era dominado há pelo menos um século e meio, desde Galileu Galilei (1564-1642) e Newton, era o da mecânica, que deve ser entendida aqui como o estudo do movimento dos corpos e das causas que geram este movimento. As três leis de Newton, a lei de Gravitação Universal (1) e o *princípio da relatividade* de Galileu eram noções bem estabelecidas entre os físicos. O princípio da relatividade é particularmente importante e então vale a pena explicá-lo um pouco mais em detalhe. Para isto precisamos de um *sistema de referência*, ou *referencial*, que é um conjunto de medidores (eixos cartesianos por exem-

plo) e um cronômetro universal, que dão a posição no espaço de um objeto com relação a uma origem num dado instante de tempo. Naturalmente existem infinitos possíveis referenciais, pois podemos escolher uma origem e os eixos como quisermos, o importante é termos 3 números independentes que nos deem informação exaustiva sobre a posição de um ponto no espaço. Segundo o princípio da relatividade de Galileu, as leis da mecânica não mudam se considerarmos referenciais distintos em movimento relativo uniforme, ou seja com velocidade constante. Por exemplo, considerem dois referenciais cartesianos (x, y, z) e (x', y', z') . Se estes referenciais estão em movimento relativo uniforme as suas coordenadas são relacionadas por uma *Transformação de Galileu*,

$$t' = t, \quad x' = x - Vt, \quad (6)$$

$$y' = y, \quad z' = z, \quad (7)$$

onde V é uma velocidade constante e t é o tempo. Por simplicidade aqui temos considerado os dois referenciais com eixos paralelos e apenas um movimento relativo uniforme ao longo de uma direção que é a mesma dos eixos x e x' , mas no caso mais geral possível os dois referenciais podem ser orientados de forma arbitrária e o movimento relativo pode ocorrer em outra direção arbitrária. O importante é que este movimento seja uniforme.

Os referenciais em movimento relativo uniforme são ditos de *Referenciais Inerciais*. Um observador acelerado com relação a outro experimentaria uma força adicional, chamada de *força fictícia* ou *força inercial*, e que nós todos conhecemos quando por exemplo estamos num ônibus e o motorista freia ou acelera ou muda de direção abruptamente.

O grande problema, que no final levou Einstein a formular a RR, surgiu na tentativa de juntar o princípio da relatividade com a teoria eletromagnética.⁴ As equações de Maxwell (2) e (4) não mantêm a mesma forma sob uma transformação de Galileu (6). Isto significa que supostamente o

⁴Juntar teorias de sucesso é uma prática comum na física e representa a nossa tentativa de achar uma ordem no caos dos fenômenos que observamos, ou seja, procurar poucas leis fundamentais que expliquem o maior número possível de ocorrências naturais. Essa prática se chama de *Reduccionismo* e funcionou muito bem durante o século XX. Recomendo o belo livro do Steven Weinberg [8] sobre “o sonho de uma teoria final” para quem queira se aprofundar neste tema da ciência.

³A velocidade da luz no vácuo tem o impressionante valor de cerca 300.000 km/s, ou aproximadamente um bilhão de km/h.

princípio da relatividade não vale para o eletromagnetismo e os fenômenos eletromagnéticos são distintos entre referenciais inerciais. O problema é que não havia evidência experimental disto e aparentemente o princípio da relatividade devia ser válido também para o eletromagnetismo.

Então o que fazer? É possível que as equações de Maxwell sejam incorretas? Certamente não, pois elas também são comprovadas experimentalmente. Além disso, essas são matematicamente elegantes demais para que pudessem ser erradas. Esta questão da elegância e da beleza matemática não é uma abordagem muito científica, é verdade, mas funcionou ao longo da história, sobretudo no século XX. Por algum motivo as teorias de mais sucesso, as que descrevem bem os fenômenos naturais, são matematicamente elegantes. Obviamente o contrário não é verdade, ou seja, não basta a elegância matemática para garantir o sucesso de uma teoria física.

Se o princípio da relatividade vale e as equações de Maxwell são corretas, quem é o culpado? Talvez o leitor já tenha adivinhado: as transformações de Galileu. Einstein insistiu que as equações de Maxwell fossem corretas e que tinha algo errado nas transformações de Galileu. Ou melhor, segundo Einstein as equações de Maxwell tinham que respeitar o princípio da relatividade, pois a física devia ser a mesma para dois observadores em movimento relativo uniforme e também quando envolvesse fenômenos eletromagnéticos. Mas isto então implicava que as transformações de Galileu não pudessem ser corretas. Tinha uma implicação mais profunda ainda. Se as equações de Maxwell gozam da propriedade chamada em jargão técnico de *covariância*, que significa que elas têm a mesma forma independentemente do referencial inercial em que estão escritas, então existe uma quantidade que não deve depender da escolha do referencial, que é um *invariante*, como por exemplo a massa na segunda lei de Newton. Esta quantidade, como pode ser visto nas equações (2) e (4) é c , a velocidade da luz no vácuo.

Agora, nós estamos acostumados com a lei de adição das velocidades de Galileu, ou seja, se um corpo se movimenta com velocidade \mathbf{v}' num referencial que por sua vez se movimenta com velocidade \mathbf{V} com relação a outro referencial, neste último o corpo terá velocidade,

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{V}, \quad (8)$$

ou seja, a soma vetorial das velocidades. Ter uma

velocidade invariante implica então que essa lei não vale mais. Além disso, é possível provar que o fato de termos uma velocidade invariante implica que o conceito de simultaneidade se torna relativo, ou seja, o tempo não pode mais ser absoluto, computado da mesma forma para todos os referenciais, mas sim ele se torna relativo assim como as distâncias. Aqui começamos enxergar o conceito de espaço-tempo. Como o tempo também é relativo, não pode existir um relógio universal que vale para todos os referenciais, mas sim o tempo deve ser parte do referencial. De fato, as transformações corretas entre dois referenciais inerciais são as *Transformações de Lorentz*,

$$\begin{aligned} ct' &= \gamma(ct - \beta x), & x' &= \gamma(x - \beta ct) \quad (9) \\ y' &= y, & z' &= z, \quad (10) \end{aligned}$$

onde:

$$\beta \equiv \frac{V}{c}, \quad \gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (11)$$

Estas transformações incluem as de Galileu no caso em que β for muito pequeno. De fato, no dia a dia lidamos com velocidades que são ridiculamente menores que c e, por isso, somente depois da descoberta das ondas eletromagnéticas, que propagam-se justamente com velocidade c no vácuo, estas transformações foram procuradas e descobertas. Como sugere o nome, não foi Einstein quem as descobriu mas sim os físicos Hendrik Antoon Lorentz (1853–1928) e George Francis FitzGerald (1851-1901), embora não para conciliar o princípio da relatividade com o eletromagnetismo, mas para explicar o resultado do famoso experimento de Michelson e Morley (1887) que sugeria que a velocidade da luz fosse um invariante [9].

Como mencionado no começo desta seção, o conceito de espaço-tempo obteve uma conotação geométrica graças ao trabalho de Hermann Minkowski (1864-1909). Conhecemos bem o espaço Euclidiano, como o cenário da mecânica clássica e também do nosso dia a dia.⁵ Neste espaço, considerando um referencial (x, y, z) e dois pontos (x_1, y_1, z_1) e (x_2, y_2, z_2) , o quadrado da distância

⁵Um espaço Euclidiano é um espaço onde o quinto postulado de Euclides vale, ou seja, entre as muitas formulações deste, por cada ponto passa somente uma reta paralela a uma reta dada. Foi um grande sucesso do século XIX descobrir que o quinto postulado de Euclides é logicamente independente dos demais e que existem espaços em que ele não é satisfeito.

entre esses dois pontos é dado pelo teorema de Pitágoras,

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2. \quad (12)$$

O Minkowski mostrou que, incluindo o tempo, o espaço-tempo é descrito por uma distância entre eventos espaço-temporais dada por,

$$-(t_2 - t_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 \quad (13)$$

$$+(y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2. \quad (14)$$

O sinal negativo na frente da variação temporal não é um erro de digitação e tem consequências muito importantes para a física que seriam difíceis de explicar em detalhe aqui. Só note que a distância no espaço-tempo não é definida positiva. De maneira infinitesimal, podemos escrever a equação acima como,

$$\begin{aligned} ds^2 &= -dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 \\ &= \sum_{\mu=0}^3 \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu, \end{aligned} \quad (15)$$

onde $\eta_{\mu\nu}$ é uma matriz diagonal com valores $(-1, 1, 1, 1)$ e é chamada *métrica de Minkowski*. É um conjunto de números, constantes, então isso sugere que o espaço de Minkowski seja plano, isto é, não possui curvatura.

3 O princípio de equivalência e a relatividade geral

A relatividade geral foi o resultado de um longo trabalho de Einstein, uma longa cadeia de tentativas e fracassos que deram origem a uma das mais bonitas e efetivas teorias da física. Não podemos entrar aqui nos detalhes matemáticos da teoria, que baseiam-se numa parte da Matemática chamada de *Geometria Diferencial*, mas podemos focar num conceito físico que inspirou Einstein, e que é conhecido com o nome de *princípio de equivalência*, introduzido por ele num artigo de 1907 [10]. Como vimos, na RR a descrição do espaço-tempo é dada pela métrica de Minkowski $\eta_{\mu\nu}$ e o próprio espaço de Minkowski (o espaço-tempo) é plano.⁶ Esse é o espaço compatível com as transformações de Lorentz e essas são válidas somente entre referenciais inerciais. Então surge

⁶Tecnicamente é pseudo-Euclidiano, e não Euclidiano, pois a métrica não é definida positiva.

naturalmente a questão do que acontece para os referenciais que estão acelerados. A primeira observação importante é que um referencial acelerado pode ser indistinguível de um referencial em repouso em um campo gravitacional. Por exemplo, pensem na situação trágica de um elevador em queda livre com uma pessoa dentro. A pessoa experimenta ausência de gravidade, ausência de peso, pois ela e o elevador estão caindo ao mesmo tempo. Esse fato de “cair ao mesmo tempo” já era notório com Galileu, que realizou experimentos de queda livre da torre de Pisa, mostrando que todos os corpos, independentemente do próprio peso, levam o mesmo tempo para chegar ao solo. Isso se chama também *universalidade da queda livre*, ou equivalência entre *massa inercial* e *massa gravitacional*. Hoje este é conhecido também como o *princípio de equivalência fraco*. O que são as massas inerciais e gravitacionais? A massa inercial é a resistência de um corpo a mudar seu estado de movimento, ou seja quando aplicamos nele uma força, ele sofre uma aceleração inversamente proporcional à massa inercial. É o m da segunda lei de Newton,

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}. \quad (16)$$

A massa gravitacional é a que sente e gera o campo gravitacional (poderia-se dividir ainda em passiva no caso de sentir e ativa no caso de gerar o campo gravitacional). É o m da Lei de Gravitacão Universal (1).

Se as duas massas (inercial e gravitacional) são iguais, os movimentos de corpos diferentes no mesmo campo gravitacional são idênticos. Por exemplo, na proximidade da superfície da Terra todos os corpos caem com a mesma aceleração $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$.⁷

O *princípio de equivalência de Einstein*, do qual surge a RG, requer que num campo gravitacional sempre possamos escolher *localmente* um referencial em que a RR seja válida. Temos que especificar *localmente*, no sentido que o referencial acima citado cobre somente uma região do espaço suficientemente pequena para que o campo gravitacional seja uniforme. O elevador em queda livre num poço de um prédio é um exemplo simples, embora truculento, de um referencial localmente inercial, onde tudo se passa como se o campo gravitacional fosse desligado. Talvez um exemplo

⁷O movimento não é exatamente o mesmo pois temos que levar em conta a resistência do ar, que depende das dimensões do corpo.

menos truculento seja a estação espacial internacional (ISS), que também se encontra em queda livre no campo gravitacional da Terra, embora haja neste caso um movimento orbital.⁸

Não é aqui o lugar certo para explicar como o princípio de equivalência levou Einstein à formulação da RG, pois haveria muitos tecnicismos inevitáveis e o leitor que não possui uma certa preparação física e matemática ficaria perdido. Basta dizer que o princípio de equivalência permite formular a teoria da gravitação como uma teoria geométrica, ou seja os fenômenos gravitacionais são a expressão do fato que o espaço-tempo não é plano, mas possui curvatura. O campo gravitacional é representado pela métrica, as forças gravitacionais pelas derivadas primeiras desta métrica e a curvatura pelas derivadas segundas dela. Tecnicamente, a métrica de Minkowski $\eta_{\mu\nu}$ é substituída por uma métrica genérica $g_{\mu\nu}(x)$, que não é mais constante, mas varia de ponto para ponto no espaço-tempo.

Naturalmente isso não basta. Temos que entender como matéria e campo gravitacional interagem entre si. Como a matéria gera um campo gravitacional encurvando o espaço-tempo? E como a matéria se movimenta no espaço-tempo curvo? A resposta a estes quesitos é dada pelas equações de campo de Einstein, que estão possivelmente entre as equações mais importantes da física. Vou escrevê-las aqui,

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}, \quad (17)$$

e não vou explicá-las em detalhe. Só preciso destacar que $G_{\mu\nu}$, o *tensor de Einstein*, é uma combinação da métrica e suas derivadas primeiras e segundas, ou seja é uma quantidade geométrica. A quantidade $T_{\mu\nu}$ é o *tensor de energia-momento* e descreve a distribuição de matéria, inclusive o seu movimento, no espaço-tempo.

⁸Talvez esta afirmação possa soar estranha. Como assim a ISS está em queda livre? Então porque não cai e se destrói na superfície da Terra? Não acontece isso pois a ISS está sim caindo na Terra, mas ao mesmo tempo se movimenta tangencialmente se afastando assim da superfície da Terra que, grosseiramente, é uma esfera. Quando falamos de órbitas, há este equilíbrio entre cair e escapar da superfície da Terra, o que tecnicamente significa possuir momento angular. A própria Terra faz o mesmo com o Sol. Não cai em cima dele, para a nossa sorte, porque “escapa” de lado com uma velocidade de cerca 30 km/s. Isto já era entendido por Newton (talvez somente por ele na época) e descrito no [6] no famoso experimento pensado do “canhão”.

Vamos agora discutir brevemente os testes experimentais que decretaram o sucesso da RG e de Einstein.

4 Os testes clássicos da relatividade geral

Os testes clássicos da RG são três:

1. A deflexão da luz em proximidade de corpos com grande massa;
2. A precessão do periélio do planeta Mercúrio;
3. O desvio para o vermelho gerado por um campo gravitacional,

e foram propostos pelo próprio Einstein. Subsequentemente um quarto teste foi proposto pelo Irwin Shapiro (1929-) em 1964 [11] e envolve o atraso de sinais (eletromagnéticos, por exemplo) que passam através de campos gravitacionais. O efeito relacionado ao teste se chama *Atraso de Shapiro* e é extremamente importante no estudo de sistemas estelares binários, mas não irei discuti-lo aqui.

Tecnicamente falando, o terceiro teste é um teste do princípio de equivalência enquanto os dois primeiros são testes de um modelo geométrico da gravidade. Ou seja, admite-se a descrição do espaço-tempo por uma certa métrica e testam-se as previsões oriundas desta configuração. Essa métrica é solução das equações de campo de Einstein (17), mas estas não são testadas diretamente, pois a mesma métrica poderia ser uma solução das equações de campo de outra teoria, diferente da RG.

O leitor atento poderia agora perguntar: e as ondas gravitacionais? De fato agora as ondas gravitacionais, com a primeira detecção ocorrida em 2015 [12], abrem um novo teste para a RG e outras teorias da gravitação, mas elas não constituem um teste “clássico”. Vale também ressaltar que a previsão da existência de ondas gravitacionais não foi considerada de grande relevância nas primeiras décadas de existência da RG pelo motivo que o sinal que é produzido por este fenômeno é tão pequeno que nunca se considerou possível uma detecção direta. De fato ela aconteceu quase um século depois do desenvolvimento da teoria e isso indica o quão difícil foi chegar neste resultado histórico. Quero destacar o adjetivo “direta” com referência à detecção. Indiretamente as

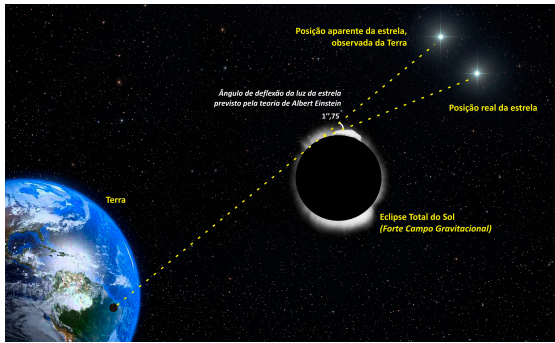


Figura 2: A deflexão de um raio de luz vindo de uma estrela longínqua. O campo gravitacional do Sol gera esta deflexão e a sua observação se torna possível só em concomitância de uma eclipse total. (Fonte: Observatório Nacional)

ondas gravitacionais já haviam sido detectadas no final da década de 1970, analisando a variação do período orbital de um sistema estelar binário descoberto por Hulse e Taylor [13].

4.1 A deflexão da luz em proximidade de corpos com grande massa

A deflexão da luz próximo a corpos com grande massa, veja a Figura 2, foi a primeira predição da RG testada.⁹ Alguém poderia reclamar que foi a predição da precessão do periélio do planeta Mercúrio que foi testada primeiro, mas eu gosto da colocação do Steven Weinberg (1933-): essa foi uma “retrodição”, e não uma predição, pois o problema da precessão do periélio do planeta Mercúrio já era conhecido bem antes que o Einstein desenvolvesse a RG.

Mas voltamos à deflexão da luz causada pela massa de um corpo. Esta predição não era na verdade totalmente nova, pois já em 1804 o astrônomo Johann Georg von Soldner (1776-1833) tinha especulado em [14] sobre a possibilidade de um raio de luz ser deflexionado por causa da atração gravitacional, descrita então pela Lei de Gravitação Universal de Newton (1). Einstein revisitou este resultado em um artigo de 1911 [10], onde utilizou o princípio de equivalência para argumentar que a luz, enquanto possui energia, possui massa também (graças à famosa relação $E = mc^2$ da RR) e, enquanto possui massa, está sujeita en-

tão à força gravitacional. Esta conexão conceitual é o que faltava na abordagem de Soldner, em que se postula que a luz simplesmente tem uma natureza corpuscular e não há necessidade de especificar a massa destes corpúsculos, pois nos cálculos ela desaparece (mas esse cancelamento providencial tem base no próprio princípio de equivalência, mais especificamente na universalidade da queda livre anteriormente mencionada).

A previsão de Einstein, no artigo [10] usando a Lei da Gravitação Universal de Newton, dava um valor de cerca 0,87 segundos de arco para um raio de luz passando próximo à superfície do Sol. Usando a RG, obtém-se um valor de cerca do dobro.¹⁰ Independentemente do valor da predição, o fato que existisse a predição em si era algo extraordinário. Especialmente hoje em dia, geralmente constroem-se teorias para que elas expliquem o que já é observado,¹¹ então a predição da deflexão dos raios de luz por um corpo massivo tratava-se de algo totalmente novo, um bônus da teoria.

Faltava obviamente testar essa predição. Mas como fazer? O leitor atento lembra que poucas linhas a cima coloquei um valor, 0,87 segundos de arco para a teoria de Newton, e o dobro para a RG, calculados para raios de luz que passem em proximidade da superfície do Sol. Agora, temos duas questões relevantes: uma é teórica, no sentido que a teoria nos diz que esses números tornam-se cada vez menores à medida que consideramos raios de luz que passam cada vez mais longe do corpo celeste, mas ao mesmo tempo tornam-se cada vez maiores à medida que consideramos corpos celestes com massa cada vez maior. Para termos um efeito mais evidente possível precisamos então de um corpo com uma massa maior possível e que os raios de luz passem o mais próximo possível deste corpo. Eis porque falamos do Sol e de raios de luz que passam próximos da superfície do Sol. É a configuração ideal, e mesmo assim o número predito é minúsculo. A outra questão relevante é como podemos observar a luz que passa próximo da superfície do Sol? Isto parece ser impossível, já que no céu durante o dia não é possível enxergar nada além do Sol

⁹A especificação de “grande” com referência à massa é, na verdade, desnecessária. Qualquer massa encurva o espaço-tempo e conseqüentemente produz uma deflexão de raios de luz que passarem nas proximidades dela. Porém, como mencionado a seguir, esse efeito é mais pronunciado na medida que a massa for maior.

¹⁰Na verdade, *exatamente* do dobro. Não posso explicar aqui os motivos deste *exatamente*.

¹¹Um exemplo que me interessa pessoalmente, já que trata-se da minha área de pesquisa, é a energia escura, uma forma de energia que seria responsável pela expansão acelerada do universo.

em si e da Lua, às vezes. O resto é tudo azul (claro, se o céu não estiver nublado). Existe uma terceira questão, na verdade, que é: de onde vêm estes raios de luz que passam em proximidade da superfície do Sol? Provavelmente não será surpreendente se eu responder: das estrelas. Então fica mais claro ainda o problema de como enxergar estas estrelas durante o dia, próximas do Sol.

A solução veio em 1919, um ano em que houve um eclipse total visível por algumas regiões da Terra, entre as quais o norte do Brasil. Uma expedição de astrônomos, liderada pelo Arthur Stanley Eddington (1882-1944), conseguiu observar em Sobral, no Ceará, o fundo estelar na proximidade do Sol durante o eclipse total e determinar que as estrelas neste fundo estavam em posições diferentes do usual. A descrição da expedição e os resultados podem ser encontrados em [16]. Veja-se também [17].

É como se o Sol agisse como uma lente. Esta foi a primeira confirmação do desvio da luz provocado por uma massa. Por outro lado, tínhamos duas teorias, a de Newton e a RG, dando conta deste efeito. Qual estava certa? Eddington e colegas foram capazes de quantificar o desvio dos raios luminosos provocado pelo Sol, e chegaram à conclusão que a RG era a teoria correta. Geralmente esse sucesso é considerado como uma verificação da RG, um teste que a RG passou, mas é importante ressaltar que os erros observacionais eram enormes e hoje em dia seriam considerados grandes demais para poder ter uma conclusão confiável. Por outro lado, parecia não haver dúvida que havia de fato um desvio dos raios de luz causado pelo Sol e como a RG predizia isto de forma natural, Einstein virou uma celebridade.

4.2 A precessão do periélio do planeta Mercúrio

O periélio de um planeta é o ponto de sua órbita que se encontra mais próximo do Sol. O fato que este ponto exista, ou seja que as órbitas dos planetas não sejam círculos, mas sim elipses, é um dos capítulos mais antigos e bonitos da história da ciência, e que obviamente não vou aprofundar aqui.

A Lei de Gravitação Universal de Newton (1) permite calcular com grande precisão e exatidão as trajetórias dos planetas do Sistema Solar. Um cálculo deste tipo pode até ser feito de maneira exata, sem o auxílio de um computador, se ima-

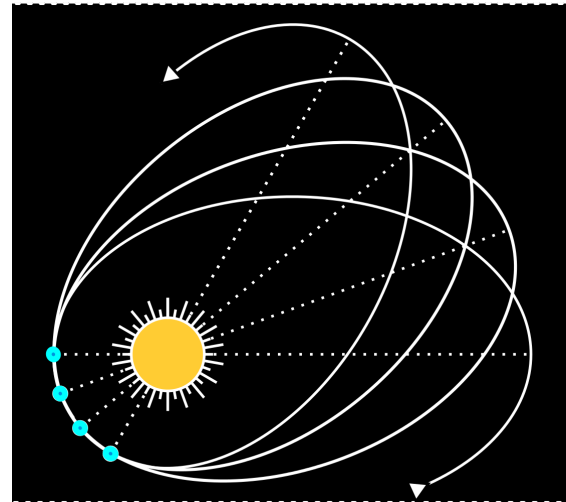


Figura 3: Visão esquemática do fenômeno da precessão. (Fonte: Wikipédia)

ginarmos uma situação com apenas dois corpos, por exemplo o Sol e a Terra. Neste caso simples e não realístico a órbita predita é imutável, ou seja possui sempre a mesma forma. Se agora introduzirmos os demais planetas, a interação gravitacional deles irá em princípio modificar essa órbita, mesmo que de forma muito leve, fazendo com que ela não seja mais imutável e impedindo que ela se feche. Neste caso o periélio não fica sempre na mesma posição para cada revolução do planeta em torno do Sol, mas tende a girar também, tende a executar justamente o que se chama de *precessão* (veja a Figura 3).

O planeta Mercúrio, o mais próximo ao Sol, possui uma órbita cujo periélio precede de 5600 segundos de arco por século, ou seja cerca de um grau e meio a cada cem anos. É incrível como um fenômeno astronômico possa ser descrito com uma tal precisão. Mais incrível ainda é que esse fenômeno pode ser predito teoricamente, através de um cálculo teórico bastante complicado, com base na Lei da Gravitação Universal de Newton (1) e tomando em conta a atração gravitacional dos demais planetas (essencialmente Vênus, a Terra e Júpiter). O problema consistia no fato que assim fazendo conseguia-se explicar somente parte dos 5600 segundos de arco por século, no específico “apenas” 5557 segundos de arco por século. Os 43 segundos de arco por século que faltam foram explicados por Einstein e pela RG.

Vale a pena comentar que no século XIX anomalias tinham sido detectadas na órbita do planeta Urano pelo astrônomo Urbain Le Verrier

(1811-1877). Urano, por assim dizer, não se “comportava” bem com relação à teoria de Newton. Le Verrier propôs que estas anomalias fossem devido à presença de outro planeta, que foi subsequentemente descoberto: Netuno. As anomalias na órbita de Mercúrio levaram ele então a postular a existência de outro planeta, numa órbita entre o Sol e Mercúrio, e que foi chamado Vulcano. Este planeta nunca foi detectado e a explicação da precessão do periélio de Mercúrio foi talvez a primeira sólida confirmação da RG.

A história de Netuno e Vulcano é um paradigma bastante usado hoje na cosmologia, no âmbito da chamada energia escura, mencionada anteriormente, e da matéria escura, que é outra componente material que não conhecemos dos nossos laboratórios na Terra, mas que parece existir porque detectamos efeitos gravitacionais, por assim dizer, inesperados. Este é justamente o paradigma: tudo começa com a observação de algo inesperado (por exemplo as anomalias na órbita de Urano). Como fazemos para explicar este “inesperado”? Falta algo para acrescentar na nossa teoria (Netuno) ou é a nossa teoria que está fora do regime em que ela vale e tem que ser estendida ou modificada (RG)?

4.3 O desvio para o vermelho gravitacional

O desvio para o vermelho sofrido por uma onda eletromagnética que “escapa” de um campo gravitacional foi o último dos testes clássicos da RG a ser efetuado e concluído com sucesso, isto em 1959. Fisicamente, a luz perde energia ao escapar de um campo gravitacional, não diferentemente de uma pedra lançada para cima. Se, por outro lado, a luz “cair” num campo gravitacional ela ganhará energia, assim como uma pedra deixada cair ganha energia (energia cinética). Essa fenomenologia foi comprovada em 1959 com o famoso experimento de Robert Vivian Pound (1919-2010) e o aluno dele Glen Anderson Rebka, Jr. (1931-2015), descrito em [18], mas cujas bases teóricas tinham sido propostas pouco antes em [19]. Eles conseguiram determinar, no porão dos laboratórios Jefferson, na Universidade de Harvard, um desvio para o azul de raios gama emitidos por uma fonte que se encontrava no sótão, 22,5 metros acima. Dessa forma, eles mostraram que o princípio de equivalência está condizente com a experiência. Esse resultado, além do

desvio para o vermelho ou para o azul de um raio de luz se propagando num campo gravitacional, confirma também a predição, muito usada nos filmes de ficção científica, que para um observador que se encontra num campo gravitacional mais forte do que se encontra outro observador, o tempo corre mais lentamente.

5 Considerações finais

Termo aqui esta breve revisão histórico-científica da teoria da relatividade geral com a seguinte pergunta: a RG é a teoria final da gravitação? A pesquisa moderna sugere que não. Quando a RG vem aplicada ao universo como um todo, na disciplina chamada de *Cosmologia*, repara-se que predições teóricas e observações concordam somente se incluirmos formas de matéria exótica, que não conhecemos dos nossos laboratórios na Terra. Estas novas formas de matéria existem? São o Netuno da Cosmologia? Ou são o Vulcano? Quem trabalha nesta última vertente se ocupa em modificar a RG para que em âmbito cosmológico seja possível ter uma explicação geométrica das componentes escuras do Universo. Acredito que seja honesto dizer que até hoje não existe ainda uma teoria que tenha suplantado a RG no mesmo sentido (bom) em que a RG suplantou a Lei de Gravitação Universal de Newton.

Agradecimentos

É um prazer agradecer aqui Isaac Torres, Leonardo Giani, Tays Miranda, Sara Aviz, Paola Terezinha Seidel e Ingrid Ferreira da Costa por terem lido o manuscrito e terem me dado importantes sugestões e comentários.

Sobre o autor

Oliver F. Piattella (oliver.piattella@cosmofes.org) se formou e se doutorou pela Università dell’Insubria, Como, Itália em 2010. Tornou-se professor adjunto da UFES em 2012. É pesquisador do CNPq e atua nas áreas de cosmologia e gravitação. Publicou 54 artigos científicos e um livro texto de cosmologia intitulado “Introduction to Cosmology”.

Referências

- [1] A. Einstein, *Die feldgleichungen der gravitation*. Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse **25**, 844–847 (1915).
- [2] A. Einstein, *Zur elektrodynamik bewegter körper*. Annalen der physik **322**, 891–921 (1905).
- [3] S. Weinberg, *Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of relativity* (Wiley, New York, 1972).
- [4] R. A. d’Inverno, *Introducing Einstein’s relativity* (Oxford University Press, Oxford, 1992).
- [5] B. Schutz, *A first course in general relativity* (Cambridge University Press, Cambridge, 2009).
- [6] I. Newton, *The Principia: mathematical principles of natural philosophy* (University of California Press, Berkeley, 1999).
- [7] J. C. Maxwell, *On physical lines of force*, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science **21**, 338–348 (1861).
- [8] S. Weinberg, *Dream of a final theory, the scientist’s search for the ultimate laws of nature* (Vintage, New York, 1992).
- [9] A. A. Michelson e E. W. Morley, *On the relative motion of the earth and of the luminiferous ether*, Sidereal Messenger **6**, 306–310 (1887).
- [10] A. Einstein, *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen*, Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik **4**, 411–908 (1908).
- [11] I. I. Shapiro, *Fourth Test of General Relativity*, Phys. Rev. Lett. **13**, 789–791 (1964).
- [12] B. P. Abbott et al, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, *Observation of gravitational waves from a binary black hole merger*, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).
- [13] J. M. Weisberg, J. H. Taylor e L. A. Fowler, *Gravitational waves from an orbiting pulsar*, Scientific American **245**, 74–83 (1981).
- [14] J. G. V. Soldner, *On the deflection of a light ray from its rectilinear motion, by the attraction of a celestial body at which it nearly passes by*, Berliner Astronomisches Jahrbuch, 161–172 (1804).
- [15] A. Einstein, *Über den einfluß der schwerkraft auf die ausbreitung des lichtes*, Annalen der Physik **340**, 898–908 (1911).
- [16] F. W. Dyson, A. S. Eddington e C. Davidson, *A determination of the deflection of light by the sun’s gravitational field, from observations made at the total eclipse of may 29, 1919*, in *Memoirs of the Royal Astronomical Society, vol. 62* (Priestley and Weale, Princeton, 1923).
- [17] L. C. B. Crispino e M. C. de Lima, *Expedição norte-americana e iconografia inédita de Sobral em 1919*, Rev. Bras. Ens. Fís. **40**(1), e1601 (2018).
- [18] R. V. Pound e G. A. Rebka Jr., *Apparent weight of photons*, Phys. Rev. Lett. **4**, 337–341 (1960).
- [19] R. V. Pound e G. A. Rebka Jr., *Gravitational red-shift in nuclear resonance*, Phys. Rev. Lett. **3**, 439–441 (1959).

Matéria escura, energia escura e a busca por uma nova teoria para a gravitação

Hermano Velten

Universidade Federal de Ouro Preto

Resumo

Vamos discutir como a teoria da relatividade geral (RG) de Einstein nos conduz aos conceitos de matéria escura e energia escura que, juntas, devem compor cerca de 95% do universo. O desconhecimento da natureza destas componentes escuras nos leva a um delicado questionamento: Será que a TRG é correta? Existiriam outras teorias para a gravitação?

Abstract

We discuss how the General Relativity (GR) theory drives us to the concepts of dark matter and dark energy which together sum up to 95% of the cosmic energy budget. The unknown nature of such dark components guide us to some delicate issues: Is GR correct? Are there others gravitational theories?

Palavras-chave: matéria escura, energia escura, relatividade geral, teorias gravitacionais modificadas.

Keywords: dark matter, dark energy, general relativity, modified gravity theories.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31674](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31674)

1 O que esperar deste texto?

Primeiramente, é necessário dizer ao leitor que existem várias teorias para a gravitação. Pode ser decepcionante para muitos, mas a teoria da relatividade geral (RG) de Einstein não é a única teoria que temos em mãos. Ela é, de fato, aquela que chamamos de teoria padrão para a interação gravitacional, mas existem algumas observações astronômicas nas quais deve-se proceder com cuidado na interpretação dos resultados da RG.

Nosso objetivo, com esse texto, é discutir algumas destas teorias. Por vezes são chamadas de alternativas à RG, outras vezes de extensões da RG. No entanto, nossa estratégia será discutir os motivos que nos levam a buscar uma teoria além da relatividade geral.

Veremos que matéria escura e energia são conceitos chave e estão por trás desta busca por uma nova teoria da gravitação. Por fim, verificaremos quais elementos da RG são abandonados ou modificados na construção das novas teorias gravitacionais.

2 Gravitação universal de Newton e seu problema do tamanho de um planeta

A relação do homem com a astronomia data dos primórdios de nossa civilização. Todas as antigas culturas possuem algum tipo de representação própria para o que hoje chamamos de estrelas, constelações ou galáxias. A partir dos trabalhos de Ptolomeu,¹ Tycho Brahe,² Johannes Kepler³ e da prática sistemática do método científico por Galileu Galilei,⁴ temos o alvorecer da astronomia moderna. A partir disso fomos levados ao entendimento atual dos cosmos em termos físicos e matemáticos. Isaac Newton⁵ nos fornece uma teoria para a gravitação com predições de fenômenos astronômicos testáveis sob o ponto de vista

¹Cláudio Ptolomeu (90 – 168), foi um cientista grego que viveu em Alexandria/Egito.

²Tyge (Tycho) Ottesen Brahe (1546 — 1601) foi um astrônomo dinamarquês.

³Johannes Kepler (1571 — 1630) foi um astrônomo, astrólogo e matemático alemão.

⁴Galileu Galilei (1564 — 1642) foi um físico, matemático, astrônomo e filósofo florentino.

⁵Isaac Newton (1643 — 1727) foi um astrônomo e cientista inglês, mais reconhecido pelos seus trabalhos como físico e matemático.

observacional. Até o século XIX, apesar da notória eficácia da teoria da gravitação Universal de Newton, surgem duas observações astronômicas intrigantes. Ambas são relacionadas a aspectos cinemáticos peculiares das órbitas dos planetas no sistema solar. Estas observações iniciariam uma revolução na astronomia. O primeiro destes episódios refere-se à várias discrepâncias, surgidas ao longo da primeira metade do século XIX, na órbita de Urano. Aparentemente, as previsões da teoria newtoniana não correspondiam ao observado. Em 1846, o astrônomo francês Urbain Le Verrier⁶ anuncia uma importante previsão sobre a existência de um novo planeta no sistema solar que poderia explicar o comportamento anômalo da órbita de Urano. Ele aponta com grande precisão a posição do suposto novo corpo celeste e rapidamente o planeta Netuno é descoberto.

O outro episódio desta trama é relacionado à órbita de Mercúrio. A órbita do planeta Mercúrio possui um deslocamento angular positivo considerável a cada revolução. Este fenômeno é comumente chamado de avanço do periélio de Mercúrio e não é compatível com a teoria de Newton para a gravitação. A constatação desta discrepância ocorre em 1859 também por Urbain Le Verrier [1]. A previsão da teoria newtoniana para o avanço do periélio da órbita de Mercúrio é de 5.557,62 segundos de arco por século. Este valor é insuficiente para alcançar o valor observado, por meio de medidas realizadas principalmente por Urban le Verrier, de cerca de 5.600,73 segundos de arco por século. Note que permanece, ainda, uma diferença de 43 segundos de arco por século que não poderia ser ignorada. Estava claro também que esta diferença não era associada a erros experimentais do ato da observação o que colocava, assim, a validade da teoria newtoniana sob forte suspeita.

Diante do sucesso obtido com a estratégia adotada no episódio da descoberta de Netuno e, portanto, dada a enorme crença na teoria de Newton, a solução encontrada para o caso da órbita de Mercúrio foi, novamente, postular a existência de outro planeta. Vulcano, assim como foi chamado o hipotético planeta, deveria orbitar o Sol em uma órbita interior a de Mercúrio e, com isso, poderia explicar tal anomalia. No entanto, Vulcano nunca foi encontrado. Tampouco foram en-

contrados corpos menores, como um cinturão de asteróides, por exemplo. A partir deste momento passava a existir uma forte evidência colocando à prova a teoria da gravitação universal de Newton.

3 A teoria da relatividade geral de Einstein e seus triunfos

Em 1915, Albert Einstein propõe sua aclamada teoria da relatividade geral (RG), que viria a ser publicada no ano seguinte. Há, na proposta de Einstein, uma previsão teórica que resolvia o problema do avanço do periélio da órbita de Mercúrio [2].⁷ Com a teoria de Einstein, um problema que atormentava a astronomia por décadas acabava de ser solucionado. Dentre outras previsões da teoria de Einstein havia ainda o fenômeno da deflexão da luz devido à curvatura do espaço tempo. Por exemplo, a luz de uma estrela, ao tangenciar um objeto como o Sol, sofreria um desvio de sua trajetória retilínea e alcançaria outra rota. Em 29 de Maio de 1919 uma equipe da Royal Astronomical Society obteve medidas da deflexão da luz durante o eclipse ocorrido na cidade de Sobral/CE. Com este resultado a RG passa a ser celebrada. Além disso, a RG ainda oferecia a previsão de novos efeitos físicos, até então não vislumbrados pela ciência. Isto inicia uma nova era para a pesquisa teórica e observacional na área de astrofísica, cosmologia e gravitação. Trata-se do capítulo inicial de uma revolução no conhecimento da interação gravitacional com consequências diretas, inclusive, no nosso dia a dia, uma vez que, por exemplo, sinais de GPS são corrigidos pelas correções relativísticas.

Até hoje não houve nenhum experimento que foi capaz de contradizer as previsões da RG.⁸ Além da precessão da órbita de Mercúrio e da previsão do desvio da luz havia ainda um terceiro teste (chamado de teste clássico) da RG. Nesse novo fenômeno da natureza revelado pela RG, fótons mudariam sua frequência desde sua emissão até sua captação por influência da interação gravitacional. Em 1959 foi realizado um experimento para testar a mudança da frequência de fótons gama emitidos por uma fonte radioativa

⁷Veja também a contribuição de O. Piattella neste mesmo volume.

⁸Como veremos adiante, matéria escura e energia escura são utilizadas para compatibilizar a RG com as observações.

⁶Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811 — 1877) foi um matemático e astrônomo francês.

do elemento Ferro 57 (contendo 26 prótons e 31 nêutrons) ao atravessar o campo gravitacional da Terra. Nesse caso, a diferença de campo gravitacional foi correspondente a altura de um prédio de 4 andares (cerca de 22,5 metros). Os pesquisadores Robert Pound⁹ e Glen Rebka¹⁰ confirmaram que, de fato, havia uma mudança na frequência destes fótons compatível com a previsão da RG [5].

Vários outros testes foram realizados desde a segunda metade do século XX até os dias atuais. Poderíamos também citar o efeito Shapiro (um atraso no tempo de viagem de sinais no sistema solar), a observação da queda do período orbital do pulsar binário de Hulse-Taylor, a própria verificação direta da existência das ondas gravitacionais e a recente imagem do buraco negro no centro da galáxia M87 como grandes triunfos da RG.¹¹ Assim, pode-se dizer que a RG é uma teoria confiável, robusta e capaz de descrever fenômenos gravitacionais assim como os observamos. Estaríamos então em uma situação de conforto, onde não há mais a necessidade de buscar um melhor entendimento da interação gravitacional? Na verdade, não. É o que veremos adiante.

4 Observações astronômicas que levaram ao conceito de matéria escura

Fritz Zwicky¹² é um dos mais importantes nomes da astronomia da primeira metade do século XX. Na década de 1930 ele dá início a um projeto de observações de velocidades de galáxias pertencentes a um aglomerado de galáxias denominado COMA. Este aglomerado é um objeto astrofísico isolado, auto-gravitante e possui cerca de mil galáxias em sua composição.¹³ Os resultados de Zwicky indicavam que a energia cinética de todo o aglomerado, calculada via a obtenção

⁹Robert Vivian Pound (1919 — 2010) foi um físico estadunidense que ajudou a descobrir a ressonância magnética nuclear.

¹⁰Glen Anderson Rebka, Jr. (1931 – 2015) foi um físico estadunidense.

¹¹Veja contribuição de Oscar Matsuura para este volume.

¹²Fritz Zwicky (1898 — 1974) foi um astrônomo suíço.

¹³Grosso modo, assim como uma galáxia é uma coleção de estrelas, um aglomerado de galáxias é uma coleção de galáxias. Não confundir este termo com os aglomerados globulares, que são grupos de centenas de estrelas. Aglomerados de galáxias são as maiores estruturas do universo com uma massa da ordem de $10^{15} M_{\odot}$.

das velocidades destas galáxias, não era compatível com a quantidade de energia potencial gravitacional, obtida através da contagem de objetos e inferência de sua massa. As quantidades de energia cinética (E_c) e potencial gravitacional (E_g) devem obedecer ao chamado teorema do virial $2E_c + E_g = 0$. A partir de suas observações, Zwicky não foi capaz de verificar o teorema do virial neste aglomerado. A energia cinética inferida excedia a quantidade de energia potencial gravitacional. Em outras palavras, faltava matéria para explicar as altas velocidades encontradas. De certa forma, deveria haver naquele sistema muito mais matéria do que podia ser observada no espectro ótico. Com esse resultado nascia o conceito de matéria escura. A hipótese de Zwicky para solucionar este problema é de que deve existir algum tipo de matéria capaz de interagir gravitacionalmente com as demais partículas e campos, mas que não emite nenhum tipo de radiação eletromagnética, logo, não é diretamente detectável.

Um segundo episódio na astronomia do século XX ocorre quando a astrônoma Vera Rubin mede a velocidades de rotação do disco de galáxias e, de maneira similar à Zwicky, conclui que as altas velocidades das estrelas não poderiam ser explicadas pela teoria newtoniana com base na quantidade de matéria diretamente observada. É importante frisar que a dinâmica de galáxias e aglomerados não necessitam de uma abordagem relativística. O fator de Lorentz para estes sistemas é praticamente igual à unidade e, portanto, a teoria newtoniana pode ser utilizada. Ainda, estes não são objetos astrofísicos compactos, como estrelas de nêutrons e buracos negros. Neste objetos os efeitos da curvatura do espaço-tempo são fundamentais fazendo o uso da RG imprescindível.

Outro fenômeno astrofísico que também indica a existência de matéria escura é o de lenteamento gravitacional. Neste caso, trata-se de uma manifestação intrínseca da RG onde a deflexão dos raios de luz vindos de um objeto astrofísico distante são lenteados, por exemplo, por uma galáxia entre a emissão e o observador. Através da medição da forma e magnitude com que a galáxia curva a trajetória de um feixe de luz é possível reconstruir o perfil de massa da lente, ou seja, do objeto que desviou a luz. Esta técnica também tem confirmado a hipótese da existência de matéria escura e, ainda, fornecido informações

precisas sobre o perfil de distribuição da matéria escura em galáxias e aglomerados de galáxias.

Fora do ambiente astrofísico, a cosmologia fornece indicações fortes sobre a existência da matéria escura.¹⁴ O universo possui 13,8 bilhões de anos. Entendemos que o processo de formação de estruturas cósmicas ocorreu de maneira hierárquica, ou seja, as menores estruturas, como nuvens estelares e protogaláxias, se formaram em um primeiro momento e a posterior evolução destes objetos, guiada pela interação gravitacional, deu origem às estruturas maiores como galáxias e aglomerados de galáxias. As observações da Radiação Cósmica de Fundo nos revela que a magnitude das flutuações na distribuição de matéria era da ordem de 1 parte em 100.000, quando o universo era muito jovem (com apenas 380.000 anos). Trata-se de um pequeno desvio da homogeneidade, mas fundamental para explicar a origem do padrão não homogêneo observado atualmente na distribuição de galáxias no universo. Estas flutuações são as sementes que viriam a formar as estruturas cósmicas que conhecemos. No entanto, há uma certa incompatibilidade ao confiar que a RG conduz a evolução das perturbações da matéria bariônica deste momento inicial até os dias atuais. A RG sozinha não é capaz de explicar o surgimento de estruturas colapsadas (não-lineares) como galáxias, por exemplo. Não há tempo suficiente, por mais que 13,8 bilhões de anos pareçam uma eternidade, para esse processo ocorra pois não há suficiente matéria no universo para impulsionar a criação das grandes estruturas cósmicas. Assim, se a matéria que forma estrelas e galáxias for deixada à sua própria sorte, ela nunca encontraria o caminho para a formação de uma estrutura astrofísica. No entanto, lembre-se que a magnitude da interação gravitacional é proporcional à massa do sistema. A saída para este enigma é assumir que a matéria escura exista no universo, desde seus instantes primordiais, e tenha papel crucial ao conduzir o processo de formação de estruturas. De maneira mais específica, a matéria escura desenvolve poços de potencial gravitacional que acelerará a aglomeração de matéria. Novamente, ao confiar na RG, é fundamental conceber a existência da matéria escura.

¹⁴Uma pequena explicação. Cosmologia é o estudo do universo como um todo, um sistema único, onde as leis da física são aplicadas para entender sua evolução global. O termo astrofísica é associado ao estudo de estruturas particulares como estrelas, galáxias e aglomerados.

5 Observações astronômicas que levaram ao conceito de energia escura

Qual o conteúdo do universo? Quais são os tipos de partículas e campos que o compõem? A partir da discussão feita até aqui, fica claro que o universo deve ser composto por matéria escura e componentes do modelo padrão de partículas como radiação (fótons e neutrinos relativísticos) e a matéria bariônica.¹⁵ Porém, um problema deste tipo de universo é que ele seria muito jovem. Dificilmente teria mais do que 10 bilhões de anos. Ao mesmo tempo, modelos astrofísicos estimam que a idade dos aglomerados globulares pode ser de até 13 bilhões de anos. Há então uma clara contradição na possibilidade de que o universo fosse mais novo do que alguns objetos que ele contém.

Em 1998 mudamos radicalmente a maneira como entendemos o universo. O desenvolvimento das observações das explosões de Supernovas indicou algo inesperado. Estes eventos apresentavam intensidade luminosa abaixo do que seria esperado para um universo em expansão desacelerada. Como solução deste problema, a primeira hipótese utilizada foi a de que universo passaria por uma fase de expansão acelerada [6] devido a existência de uma nova componente cósmica. Como efeito dinâmico resultante, tais objetos estariam, de certa forma, mais distantes do observador o que explicaria seu brilho ser menor. Dada a natureza atrativa da atração gravitacional, uma expansão acelerada deveria ser ocasionada por algum tipo de matéria com propriedades antigravitacionais. A este tipo de entidade deu-se o nome de energia escura. Na formulação da RG para um universo em expansão, a energia escura pode ser compreendida com um fluido com pressão (suficientemente) negativa. Basta lembrar que na RG a pressão também “gravita”, ou seja, ela é capaz de induzir uma modificação no espaço-tempo e, conseqüentemente, determinar a dinâmica de expansão. De maneira equivalente ao uso de um fluido com pressão negativa, a famosa constante cosmológica de Einstein (uma quantidade geométrica introduzida por Einstein na RG para evitar

¹⁵O termo matéria bariônica é um jargão utilizado para representar toda a matéria conhecida, uma vez que os bárions (partículas pesadas como prótons e nêutrons) contribuem muito mais para a soma de toda a massa da matéria conhecida do que mésons (partículas de massa intermediária) e léptons (partículas leves).

a contração e colapso do universo) também seria capaz de explicar tal fenômeno.

6 O inventário cósmico

Como resumo do que foi exposto até aqui chegamos à conclusão que matéria e energia escuras devem compor o inventário cósmico. Mas qual seria a proporção destas componentes no balanço total do conteúdo cósmico? Elas são tão relevantes assim? Antes de responder a esta pergunta é importante frisar um resultado, um tanto quanto óbvio, que surge no estudo da dinâmica de um universo. A densidade de suas componentes depende do tempo. Assim, a composição do universo não permaneceu constante desde seu início até os dias atuais.

Uma aproximação muito comum em cosmologia utiliza a ideia de que a expansão cósmica, acima da escala de homogeneidade, pode ser idealizada através da fluidodinâmica, ou seja, podemos visualizar a expansão global do universo como resultado da mistura efetiva de diferentes fluidos. A densidade de cada uma dessas componentes cósmicas depende de sua equação de estado $p = w\rho$ que relaciona sua pressão p com a sua densidade ρ e onde w é chamado de parâmetro da equação de estado.

A combinação de todas as fontes observacionais indica que a distribuição do inventário cósmico atual obedece a seguinte proporção: Todas as partículas relativísticas correspondem a cerca de 0,005%; a matéria comum, dita bariônica, a quase 5%; a matéria escura aproximadamente 25% enquanto que a energia escura 70%. Estes números refletem nossa ignorância sobre o universo. A grande maioria (95%) da atual composição cósmica está distribuída nas componentes escuras das quais não temos conhecimento sobre sua natureza e origem. Abaixo discutiremos com mais detalhes a obtenção destas proporções.

7 A expansão do universo e a teoria da relatividade geral

O trabalho de Edwin Hubble¹⁶ no fim da década de 1920 foi crucial para o desenvolvimento da cosmologia moderna. Primeiramente, suas

¹⁶Edwin Powell Hubble (1889 — 1953) foi um astrônomo estadunidense.

observações foram importantes para certificar a existência de outras galáxias, além da nossa Via Láctea. Assim, como consequência desta observação, ele estabeleceu um ingrediente chave para a cosmologia moderna que é a expansão do universo. Hubble verificou que galáxias se distanciam das outras com uma velocidade proporcional à sua distância. Para descrever esse processo é preciso parametrizar a expansão do universo em termos do fator de escala cósmico $a(t)$. Dessa maneira, a distância física \mathbf{r}_f entre dois objetos em um certo instante t pode ser escrita como $\mathbf{r}_f = a(t)\mathbf{r}_0$, onde \mathbf{r}_0 é uma distância fixada em um instante t_0 que pode ser identificado com o tempo presente. Na nossa notação, o subíndice 0 denota o valor de uma quantidade física medida hoje. Com isso, acabamos de definir que o fator de escala do universo atual é $a(t_0) = a_0 = 1$. Calculando a derivada temporal $\dot{\mathbf{r}}_f$ obtemos a velocidade de expansão \mathbf{v}_f , com isso,¹⁷

$$\dot{\mathbf{r}}_f \equiv \mathbf{v}_f = H(t)\mathbf{r}_f, \quad (1)$$

onde $H(t)$ é a taxa de expansão do universo

$$H(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}. \quad (2)$$

Se esta relação é tomada no tempo presente com $H(t_0) \equiv H_0$, a relação (1) torna-se a famosa lei de Hubble, sendo H_0 a chamada constante de Hubble. Recentemente, esta nomenclatura foi modificada para incluir o nome de Lemaitre pois ela já havia surgido em trabalhos anteriores à Hubble [3].

Com esta convenção $a_0 = 1$ o fator de escala passa a ser relacionado com o parâmetro do desvio para o vermelho (redshift) cósmico z por meio da definição $a(t) = (1+z)^{-1}$. Assim, o tempo presente corresponde à $z = 0$. O passado longínquo ocorre no limite $z \rightarrow \infty$ ($a \rightarrow 0$), ou seja, O limite futuro $a \rightarrow \infty$ ocorreria em $z = -1$.

A RG é a teoria padrão para descrever os processos que envolvem a interação gravitacional. Nossa ideia daqui em diante é fazer uma breve introdução de seu aparato ferramental.¹⁸

¹⁷Temos em mente o chamado tempo cósmico t medido em segundos. O fator de escala e o desvio para o vermelho são outras formas de parametrizar a evolução temporal do universo.

¹⁸Existem ótimos livros sobre a RG mas, em sua grande maioria, são escritos na língua inglesa. Uma ótima referência, em língua portuguesa, sobre a RG pode ser encontrada em [4]. Veja novamente a contribuição de Oliver Piattella à este volume.

O ponto de partida será introduzir a chamada equação de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (3)$$

Não é o objetivo deste trabalho deduzir a equação acima. Tenha em mente que o elemento chave de uma geometria é o tensor métrico $g_{\mu\nu}$. Analisando uma geometria em 4 dimensões, uma temporal e três espaciais - (1+3) - os índices assumem valores $\mu \rightarrow (0, 1, 2, 3)$ que correspondem às coordenadas (t, x, y, z) . A partir de $g_{\mu\nu}$ podemos calcular o tensor de Ricci $R_{\mu\nu}$ e o escalar de Ricci $R \equiv R_{\mu\nu}g^{\mu\nu}$. O termo Λ é a constante cosmológica. Assim, um objeto do tipo $R_{\mu\nu}$ deve ser idealizado como uma matriz 4x4. Todo o lado esquerdo de (3) representa a geometria do espaço-tempo. A parte do conteúdo material é representada pelo tensor energia-momento $T_{\mu\nu}$ que se encontra ao lado direito desta equação. G é a mesma constante da gravitação de Newton. A equação de Einstein descreve, de uma maneira bem geral, a interação entre a distribuição de matéria com a geometria do espaço-tempo. E como encontrar soluções desta equação? O primeiro passo é impor a simetria adaptada ao problema físico que se tem em mãos. Na cosmologia padrão esta simetria é motivada pelo Princípio Cosmológico, que diz que o universo é homogêneo e isotrópico em grandes escalas. Assim, ao exigir este tipo de simetria passa-se a fixar a métrica do espaço-tempo como a de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

$$ds^2 = -dt^2 + a(t)^2 \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + d\Omega^2 \right], \quad (4)$$

onde a constante k representa a curvatura espacial. O objetivo final é, a partir da equação de Einstein, determinar a forma funcional do fator de escala $a(t)$. Utilizando (4) na Eq. (3) obtém-se a chamada equação de Friedmann

$$H^2 + \frac{kc^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \sum_i \rho_i + \frac{\Lambda c^2}{3}, \quad (5)$$

sendo ρ_i a densidade de energia associada cada componente i que compõe $T_{\mu\nu}$. Dadas as identidades geométricas de Bianchi, assume-se que cada componente conserva-se, ou seja, não interage com as demais via troca de energia ou momento. Dessa forma, elas obedecem individualmente à equação da continuidade

$$\dot{\rho}_i + 3H \left(\rho_i + \frac{p_i}{c^2} \right) = 0. \quad (6)$$

Esta equação determina a evolução temporal da densidade de energia do fluido i uma vez que sua equação de estado $p_i(\rho_i)$ é conhecida.

Para cada componente define-se um parâmetro de densidade fracionária

$$\Omega_i(z) = \frac{\rho_i(z)}{\rho_{c0}}, \quad \text{com} \quad \rho_{c0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \quad (7)$$

onde ρ_{c0} é a densidade crítica do universo hoje. A partir desta definição também encontra-se o valor da densidade fracionária da componente i hoje, ou seja, $\Omega_{i0} = \rho_i(0)/\rho_{c0}$. De uma maneira similar vamos definir as quantidades análogas para as demais componentes de (5) que podem atuar como fonte da expansão

$$\Omega_{k0} = -\frac{kc^2}{H_0^2} \quad \text{e} \quad \Omega_{\Lambda 0} = \frac{\Lambda c^2}{3H_0^2}. \quad (8)$$

Ao assumir que a composição do universo consiste de radiação ($i = r$), com equação de estado $p_r = \rho_r c^2/3$, e matéria ($i = m$), com equação de estado $p_m = 0$, e resolvendo a equação da continuidade (6) para cada fluido, a Eq. (5) é reescrita como

$$\frac{H^2(z)}{H_0^2} = \Omega_{r0}(1+z)^4 + \Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{k0}(1+z)^2 + \Omega_{\Lambda 0}. \quad (9)$$

Com esta expressão um modelo de referência pode ser construído. A tarefa, a partir da Eq. (9), é obter o valor das densidades fracionárias de radiação Ω_{r0} , de matéria Ω_{m0} (que é composta por uma parte de matéria bariônica Ω_{b0} e matéria escura Ω_{dm0}), da curvatura espacial Ω_{k0} e da energia escura $\Omega_{\Lambda 0}$. Já adiantamos o valor aproximado destes parâmetros acima. Ainda, é fundamental conhecer a constante de Hubble H_0 . A obtenção de dados astronômicos precisos é fundamental para a determinação destes parâmetros cosmológicos. A seguir, vamos discutir brevemente quais foram (e tem sido) alguns dos principais resultados observacionais que ajudaram a pavimentar o caminho até a formulação de um modelo cosmológico de concordância.

8 Construindo um modelo padrão para a cosmologia

As observações da Radiação Cósmica de Fundo (RCF) foram fundamentais para estabelecer alguns fatos. A própria existência da RCF é um

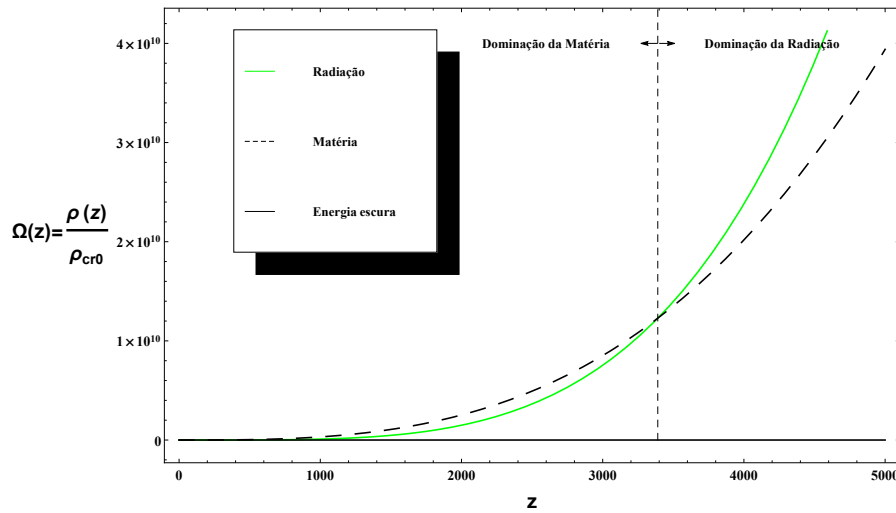


Figura 1: Evolução da densidade fracionária de energia da radiação (verde), matéria (tracejado) e energia escura (linha preta horizontal) como uma função do desvio para o vermelho (z).

grande sucesso do chamado modelo do *Big Bang*. A RCF é, na verdade, uma relíquia do passado quente e denso do universo. Uma característica importante da RCF é possuir um espectro típico de corpo negro que possui uma temperatura específica associada à esta distribuição de radiação. Quando sabemos a temperatura desta distribuição, imediatamente encontramos duas densidade. Com isso, podemos afirmar com grande precisão que a densidade fracionária da radiação hoje é $\Omega_{r0} = 9.29 \times 10^{-5}$. A RCF também é fundamental para determinar que o universo não admite um valor considerável de curvatura. Em outras palavras, temos, na prática, que $\Omega_{k0} \approx 0$. Assumindo um universo plano $\Omega_{k0} = 0$ e fazendo $z = 0$ em (9) a quantidade de energia escura pode ser escrita como $\Omega_{\Lambda 0} = 1 - \Omega_{m0}$. Estes resultados simplificam o número de parâmetros livres da Eq. (9) para apenas dois, H_0 e Ω_{m0} . Neste estágio, construímos o chamado modelo Λ CDM plano que figura como melhor descrição para a expansão do universo recente,

$$\frac{H^2(z)}{H_0^2} \simeq \Omega_{m0}(1+z)^3 + 1 - \Omega_{m0}. \quad (10)$$

Por fim, o conjunto de diversas observações leva a um cenário onde $\Omega_{m0} \approx 0.3$. É importante lembrar, no entanto, que a quantidade de bárions está incluída em Ω_{m0} . Dentro do cenário da bariogênese cósmica determina-se $\Omega_{b0} \approx 0.05$, o que significa dizer que cerca de 25% do cosmos atual é composto por matéria escura. Com isso,

chegamos ao resultado $\Omega_{\Lambda 0} \approx 0.7$.

O valor exato do parâmetro de Hubble H_0 é tema de grande debate atual na literatura. Existem distintas formas de se obter H_0 . A partir das análises estatísticas com dados cosmológicos, justamente o cenário descrito no parágrafo anterior, encontra-se um valor próximo a $H_0^{cos} \approx 69$ km/s/Mpc [7]. Por outro lado, a velocidade de recessão de galáxias e outros objetos astrofísicos próximos à nossa galáxia pode ser determinada diretamente. Este tipo de análise indica valores $H_0^{ast} \approx 73$ km/s/Mpc [8]. Trata-se de uma tensão considerável mesmo quando as barras de erros associadas a estes valores são levadas em consideração. A origem desta diferença é um dos grandes problemas atuais da astrofísica e cosmologia.

Ao utilizar estes números para os parâmetros cosmológicos podemos visualizar como as densidades de energia evoluíram desde o universo primordial até o hoje $z = 0$. Assim como demonstrado na Figura 1, o universo era dominado pela radiação - o termo $\Omega_{r0}(1+z)^4$ domina o lado direito de (9) - em um momento anterior ao desvio para o vermelho $z \approx 3400$. Isso corresponde ao momento que o universo tinha apenas 60.000 anos de existência. É bom lembrar que a idade do universo não segue uma relação linear com o desvio para o vermelho. Do momento $z \approx 3400$ até o desvio para o vermelho $z \approx 0.3$, correspondendo a cerca de 3,5 bilhões de anos atrás, a dinâmica cósmica é dominada pela matéria. Isso é fundamental para a execução do processo de formação

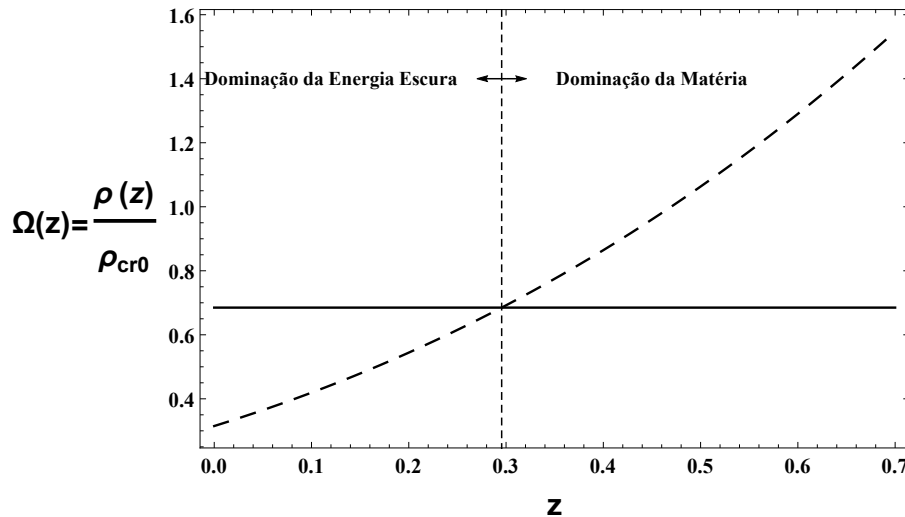


Figura 2: Evolução da densidade fracionária de matéria (tracejado) e energia escura (linha preta horizontal) como uma função do desvio para o vermelho (z).

de estruturas pois é nessa etapa que galáxias e aglomerados de galáxias se formam. A Figura 2 é equivalente à Figura 1. No entanto, ela mostra mais detalhes sobre o período recente onde a energia escura passa a dominar a dinâmica da expansão cósmica. A densidade fracionária da energia escura, na forma de uma constante cosmológica, é representada pela linha sólida horizontal. A partir deste instante a expansão acelerada do universo impede a aglomeração de matéria nas escalas cósmicas. Isso faz com os aglomerados de galáxias sejam as maiores estruturas virializadas observadas no universo.

9 Precisamos de uma nova teoria para a gravitação?

A discussão feita nas seções anteriores deixa a percepção de que matéria escura e energia escura são ingredientes fundamentais no universo. No entanto, é possível reinterpretar as observações de outra maneira: a introdução das componentes escuras surgiu da ineficácia da RG em descrever os fenômenos observados e, portanto, devemos buscar uma nova teoria para a gravitação. De fato, matéria escura e energia escura são artifícios utilizados para acomodar a RG dentro da construção de um modelo cosmológico padrão. O ponto chave desta discussão é que não temos certeza absoluta da existência destas componentes escuras. Não há, até agora, observação direta das partículas que compõem a matéria ou a ener-

gia escura.¹⁹ O que há, de fato, e não se discute, são os fenômenos astronômicos observados como a curva de rotação de galáxias espirais (que necessita de algo como matéria escura) e a expansão acelerada do universo (que necessita de algo como a energia escura). No caso específico da energia escura, sua explicação teórica via a descrição de uma constante cosmológica Λ , interpretada como efeito de flutuações quânticas do vácuo, leva ao chamado *problema da constante cosmológica*. Se utilizarmos a teoria quântica de campos (TQC) para fazer uma predição do valor teórico esperado para Λ encontra-se que a diferença entre teoria e observação é $\sim 10^{120}$. Este número não está errado. A TQC nos diz que a densidade associada a Λ é 10^{120} maior do que o valor $\Omega_\Lambda \sim 0.7$ obtido por meio das observações astronômicas. Temos, portanto, um bom motivo para buscar uma alternativa à constante cosmológica.

A partir deste ponto passamos a discutir uma linha de investigação na área de astrofísica, cosmologia e gravitação que busca alternativas e extensões à gravitação padrão.²⁰ Trata-se de uma

¹⁹Durante a confecção de este artigo a colaboração Xenon1T (experimento dedicado à detecção direta da matéria escura) divulgou resultados apontando um excesso de eventos que poderia ser explicado pela existência de matéria escura. No entanto, existem outras duas explicações para estes eventos que não foram descartadas e que não tem relação com a matéria escura. Detalhes em <http://www.xenon1t.org/>.

²⁰O termo gravitação padrão refere-se tanto ao uso da teoria da gravitação universal de Newton, quando apropriadamente dentro do limite clássico, quanto ao uso da

área não tão tradicional na física, mas que tem crescido muito na última década. Vamos discutir superficialmente algumas destas abordagens. Será impossível citar aqui todas estas propostas, até mesmo porque muitas das teorias alternativas já foram descartadas por algum tipo de observação astronômica e não seria muito proveitoso discutir modelos em desuso. Algumas teorias propostas ainda sobrevivem na arena de candidatas de sucessoras à gravitação padrão. No entanto, enquanto não houver algum resultado que contradiga a predições da RG, continuamos a tratar todas outras teorias como especulativas.

O processo de criação destas teorias alternativas deve iniciar com a hipótese de que algum aspecto da gravitação padrão poderia ser, na verdade, modificado. Algumas destas propostas de mudança são fisicamente motivadas, enquanto outras se baseiam em especulações e ideias mais abstratas. Nas próximas seções abordamos algumas das propostas mais populares neste campo.

9.1 MOND

MOND (Modified Newtonian Dynamics - Dinâmica Newtoniana Modificada) não nasce como uma teoria gravitacional alternativa. Trata-se, originalmente, de uma proposta de modificação da segunda lei de Newton visando resolver o problema da matéria escura em galáxias [9]. A ideia é muito simples. A segunda lei de Newton seria substituída por uma relação do tipo

$$F = m\mu(x)a, \quad (11)$$

onde é definida uma variável sem dimensão $x = a/a_0$ sendo a_0 uma constante com dimensão m/s^2 . A função $\mu(x)$ depende do valor da variável x da seguinte forma: $\mu(x) \approx 1$, se $x \gg 1$ ($a > a_0$) e $\mu(x) \approx x$, se $x \ll 1$ ($a < a_0$). E qual o valor de a_0 ? O valor inicialmente proposto para esta constante seria da ordem de $a_0 \sim 10^{-10}m/s^2$. Acelerações que experimentamos no dia a dia são superiores a este valor, por exemplo, a aceleração da gravidade da superfície da Terra é da ordem de $10m/s^2$. Mas existiriam objetos com acelerações tão pequenas? Na verdade, sim, e justa-

RG, quando efeitos relativísticos devem ser considerados. Por exemplo, estrelas anãs brancas podem ser estudadas com a gravitação de Newton, enquanto estrelas de nêutrons, muito mais compactas, devem ser estudadas por meio da RG. Em ambos os casos estamos nos referindo ao que chamamos de gravitação padrão.

mente estrelas orbitando galáxias possuem acelerações centrípetas dessa ordem. Para verificar isto, basta substituir valores típicos da velocidade de rotação de estrelas $v \sim 100km/s$ orbitando o centro da galáxias a distâncias da ordem de $10Kpc$ na expressão v^2/r . Verifica-se que valores $\lesssim 10^{-10}m/s^2$ serão encontrados. Apesar de resolver parcialmente o problema da curva de rotação de galáxias, assim indicando que a matéria escura não seria necessária (veja, por exemplo [10] para uma discussão desse problema), a proposta MOND encontra alguns problemas. Talvez, o principal deles é que a constante a_0 não aparenta ter o caráter de uma constante universal, que possuiria um valor único para todos os sistemas astrofísicos [11, 12].

9.2 Teorias escalares-tensoriais

Para discutir a formulação de teorias alternativas é preciso, primeiramente, ter em mente como a RG é construída. A RG é uma teoria tensorial sendo a interação gravitacional unicamente determinada pelo tensor métrico $g_{\mu\nu}$. Um componente matemático fundamental na construção de uma teoria gravitacional é a ação desta teoria. A obtenção das equações de campo da RG se dá a partir da aplicação do Princípio de Hamilton (ou, Princípio da mínima ação) à chamada ação de Einstein-Hilbert S_{EH} ,

$$S_{EH} = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{R}{2\kappa} + \mathcal{L}_{mat} \right), \quad (12)$$

com $\kappa = 8\pi Gc^{-4}$. Na ação acima temos elemento de volume quadridimensional d^4x , o determinante da métrica g e o escalar de Ricci R . O papel da Lagrangiana da matéria \mathcal{L}_{mat} é incluir a contribuição de todas as formas de matéria e energia nas equações da teoria. O elemento chave desta ação, que designa a RG, é o escalar de Ricci R . Assim, com a aplicação do princípio variacional nesta ação podemos obter imediatamente a equação de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (13)$$

Diferentemente da Eq. (3), aqui não consideramos a constante cosmológica Λ .

Importante deixar claro que teorias gravitacionais obedecem, portanto, a uma estrutura triplíce: i) deve-se propor a ação S da teoria, ii) a partir desta ação encontra-se as equações de

campo desta teoria e iii) por fim, uma vez que estabelecemos a geometria do problema em questão, como na Eq. (4), temos as suas soluções a exemplo das equações de Friedmann.

Teorias escalares-tensoriais são propostas onde a gravitação é mediada tanto por $g_{\mu\nu}$ quanto por um campo escalar ϕ . O conceito de campo escalar é muito utilizado na física. Por exemplo, a gravitação clássica de Newton faz uso de potencial gravitacional escalar. A partir do gradiente deste potencial gravitacional escalar podemos obter os conceitos de força gravitacional e aceleração gravitacional. Da mesma maneira, nas teorias escalares-tensoriais, gradientes deste campo escalar cosmológico ϕ ²¹ dariam origem a um novo tipo de força, muitas vezes chamada de quinta força ou força escura, que poderia explicar os fenômenos observacionais associados à matéria e energia escura sem a necessidade destas componentes.

9.2.1 Teoria de Brans-Dicke

Teorias escalares-tensoriais foram formuladas por Jordan,²² mas a teoria de Brans-Dicke, proposta em 1961, é um exemplo clássico deste tipo de teoria [13]. Ela serve, até hoje, como protótipo para teorias mais modernas. A parte geométrica de sua ação (não escrevendo aqui a contribuição \mathcal{L}_{mat}) é

$$S_{BD} = \int d^4x \frac{\sqrt{-g}}{2\kappa} \left(\phi R - \frac{\omega_{BD}}{\phi} \partial_\alpha \phi \partial^\alpha \phi \right). \quad (14)$$

Note que o campo escalar ϕ está presente desde a concepção desta teoria. O valor do parâmetro ω_{BD} deve ser obtido a partir das observações. É possível argumentar que a teoria de Brans-Dicke recai na RG quando $\omega_{BD} \rightarrow \infty$, mas essa discussão não é tão trivial e é tema de debates recentes.

9.2.2 Teorias Horndeski

As teorias Horndeski [14] são muito populares pois elas apresentam uma alternativa viável e elegante para o problema da energia escura. São as teorias escalares-tensoriais mais gerais possíveis cujas equações de campo são de segunda ordem (evitando a complexidade existente ao se tratar

com equações de ordens maiores) e estáveis. Vamos omitir a descrição de sua ação neste texto devido à sua enorme estrutura. Por ser tão geral, todas teorias gravitacionais discutidas aqui podem se encaixar como subclasses das teorias Horndeski, inclusive a RG.

9.3 Teorias $f(R)$

Outra classe de teorias alternativas à RG é representada pelas teorias $f(R)$. É possível interpretar as teorias $f(R)$ dentro da classe das teorias escalares-tensoriais, mas isso requer o conhecimento da utilização de técnicas de mudança do referencial de Jordan (onde a teoria é construída) para o referencial de Einstein (onde a ação tem forma similar à S_{EH}), o que está além do nível deste texto. Aqui, a estrutura da ação de Einstein-Hilbert é mantida. No entanto, o escalar de Ricci R é substituído por uma composição mais complexa desta quantidade. A ação desta teoria é

$$S_{f_R} = \int d^4x \sqrt{-g} \left(\frac{f(R)}{2\kappa} \right). \quad (15)$$

Existem diversas propostas para a forma funcional de $f(R)$. Talvez o mais famoso deles é o modelo de Starobinsky onde $f(R) = R + \alpha R^2$ [15].

Em analogia à proposta das teorias $f(R)$ é importante citar a existência de várias outras teorias gravitacionais baseadas na substituição do escalar de Ricci R por outra função. Nesta classe, pode-se construir várias teorias do tipo $f(R, \dots)$. Por exemplo, temos as teorias $f(R, T)$ onde T é o traço de $T^{\mu\nu}$; $f(R, \mathcal{G})$ onde \mathcal{G} é o termo de Gauss-Bonnet; teorias com teleparalelismo $f(R, \mathcal{T})$; teorias $f(R, R_{\mu\nu} T^{\mu\nu})$; teorias com o d'Alembertiano \square do escalar de Ricci $f(R, \square R)$, etc.

9.4 Abandonando pilares da RG

Um último grupo de teorias que vamos citar são aquelas onde se abandona alguns dos pilares sobre os quais a RG foi construída. Podemos citar teorias como a gravidade massiva, onde é atribuída massa ao gráviton (partícula que intermediaria a interação gravitacional); teorias não-locais, equivalentes a introduzir potências negativas do d'Alembertiano do escalar de Ricci; teorias com dimensões extras, ou seja, além das 4 dimensões usuais; teorias com violação de causalidade, etc.

Um aspecto fundamental da RG advém das chamadas identidades de Bianchi que atestam

²¹O uso do termo "cosmológico" dá a noção de que este campo escalar permeia todo o espaço, atuando em todas as escalas da natureza, inclusive no nível da cosmologia.

²²Ernst Pascual Jordan (1902 – 1980) foi um físico teórico alemão.

que o tensor de Einstein possui divergência nula, ou seja, $(R^{\mu\nu} - Rg^{\mu\nu}/2)_{;\nu} = 0$. Como consequência, temos que $T^{\mu\nu}_{;\nu} = 0$. Esta última igualdade fornece a noção de conservação de energia. De fato, as leis de conservação são fundamentais na física e são observadas em experimentos. Na cosmologia este resultado é fundamental para se obter a equação da continuidade (6) que dá sustentação ao modelo cosmológico padrão. Algumas teorias alternativas fazem uso da hipótese que a conservação de energia poderia ser violada em ambiente de alta curvatura do espaço-tempo. Um exemplo é a teoria de Rastall que parte do pressuposto que $T^{\mu\nu}_{;\nu} \sim R^{;\mu}$ [16], ou seja, não há mais a conservação de energia.

10 Reconciliação com os testes clássicos da RG

A RG verifica-se em todos os possíveis testes como o periélio de Mercúrio, o desvio da trajetória luz por uma fonte gravitacional, o desvio para o vermelho gravitacional, o decaimento do período orbital de pulsares binários, etc. E o que ocorre com as teorias alternativas? Elas também passam nestes testes? A resposta para esta pergunta depende, evidentemente, de qual teoria gravitacional alternativa estamos lidando. Há, no entanto, teorias que possuem predições diferentes da RG. Isso significa que elas estariam descartadas? A princípio, sim. Mas, para salvar estas teorias, existem os chamados mecanismos de blindagem. Estes mecanismos teóricos são incrementos nestas teorias que possibilitam a conciliação com os testes locais.

11 Comentário Final

Iniciamos este trabalho discutindo a aplicação da Teoria da Relatividade Geral no estudo da cosmologia. Como consequência, fomos levados a aceitar a existência de duas componentes misteriosas denominadas Matéria Escura e Energia Escura. Estes resultados não enfraquecem a ideia de que a RG deve representar a maneira de descrever a interação gravitacional. Mas, existem, de fato, outras teorias que podem ser consideradas viáveis. Apesar de não termos motivos para desconfiar da validade da RG, também não podemos

simplesmente descartar todas as outras alternativas. Ainda há um longo caminho a se percorrer até conhecermos o que há em todo cosmos. Sem dúvida, faz parte deste percurso conhecer melhor os fenômenos que associamos à matéria escura e energia escura. O século XXI deve ser fundamental neste processo. Entramos na chamada *era das ondas gravitacionais*. Em 2015, após 100 anos desde o nascimento da RG e o surgimento do conceito de onda gravitacional, a colaboração LIGO conseguiu detectar estas perturbações do espaço-tempo. Desde então, temos investigado com grande detalhe fenômenos associados aos estágios finais de objetos como buracos negros e estrelas de nêutrons. Como exemplo recente, a velocidade de propagação das ondas gravitacionais foi obtida e seu valor é, com enorme precisão, o mesmo valor que a velocidade da luz no vácuo c . Isto está de acordo com a RG mas algumas teorias gravitacionais modificadas, notadamente alguns setores das teorias Horndeski, foram descartadas pois admitiam uma velocidade de propagação diferente de c . Estes resultados tem guiado rapidamente a comunidade de pesquisadores na área de gravitação para o refinamento e aperfeiçoamento destas teorias. Os próximos anos serão fundamentais no entendimento destas teorias.

Agradecimentos

Agradeço o apoio financeiro do CNPq/FAPES e PROPP/UFOP. Também gostaria de agradecer a Raquel Fazolo e Ediones Paulino Castilho pela leitura deste texto e sugestões.

Sobre o autor

Hermano Endlich Schneider Velten (hermano.velten@ufop.edu.br) é professor da UFOP. É doutor em física pela UFES e bolsista de produtividade do CNPq. Fez estágios de pós-doutoramento na Alemanha e França. O foco de suas pesquisas encontra-se nas áreas de astrofísica e cosmologia.

Referências

- [1] U. Le Verrier, *Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*, Comp-

- tes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences **49**, 379–383 (1859).
- [2] A. Einstein, *Die Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie*, Ann. der Phys. **49**, 769–822 (1916).
- [3] G. Lemaitre, *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques* Annales de la Société Scientifique de Bruxelles **A47**, 49–59 (1927) [Traduzido para o inglês em MNRAS **41**, 483 (1931)].
- [4] A. B. Henriques, *Teoria da relatividade geral: uma introdução* (Lisboa, Editora IST Press, 2009)
- [5] R. V. Pound e G. A. Rebka Jr., *Gravitational red-Shift in nuclear resonance*, Phys. Rev. Letters **3**, 439–441, (1959).
- [6] A. G. Riess et al. *Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and cosmological constant*, Astron. J. **116**, 1009–1038 (1998); S. Perlmutter et al. *Measurement of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae*, Astrophys. J. **517**, 565–586 (1999).
- [7] PLANCK Collaboration, *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*, [arXiv:1807.06209v2](https://arxiv.org/abs/1807.06209v2) (2019).
- [8] T. Shanks, L. M. Hogarth, N. Metcalfe, *Gaia cepheid parallaxes and local hole relieve H_0 tension*, MNRAS: Letters **484**(1), L64–L68 (2019).
- [9] M. Milgrom, *A modification of Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis*, Astrophys. J. **270**, 365–370 (1983).
- [10] H. E. S. Velten, *MOND: uma alternativa à mecânica newtoniana*, Rev. Bras. Ens. Fís. **30**(3), 3314.1–3314.5 (2008).
- [11] J. Fabris and H. Velten, *MOND virial theorem applied to a galaxy cluster*, Braz. J. Phys. **39**, 592–595 (2009).
- [12] D. C. Rodrigues, V. Marra, A. del Popolo e Z. Davari, *Absence of a fundamental acceleration scale in galaxies*, Nature Astron. **2**(8), 668–672 (2018).
- [13] C. Brans e R. H. Dicke, *Mach's principle and a relativistic theory of gravitation*, Phys. Rev. **124**, 925–935, (1961).
- [14] G. W. Horndeski, *Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space*, IJTP **10**(6), 363–384 (1974).
- [15] A. A. Starobinsky, *Disappearing cosmological constant in $f(R)$ gravity*, JETP Lett. **86**, 157–163 (2007).
- [16] P. Rastall, *Generalization of the Einstein theory*, Phys. Rev. D **06**(12), 3357–3359 (1972).

A primeira imagem de um buraco negro

Oscar T. Matsuura

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, e
Museu de Astronomia e Ciências Afins

Resumo

Considere ao pé-da-letra a expressão “imagem de um buraco negro”, atribuindo a cada palavra o significado usual. Verá que ela não faz muito sentido e, se faz, soa estranha. É que a expressão é científica. Cada palavra adquiriu significado num vasto contexto de conceitos articulados numa teoria; esses conceitos, por sua vez, muitas vezes têm referências empíricas laboratoriais ou observacionais (astronômicas); o desenrolar histórico, normalmente imprevisível de descobertas observacionais ou de criações intelectuais, também adiciona às palavras, não explicações causais, mas meras referências casuais. Considerando a importância da popularização da ciência, como meio de promover a necessária alfabetização e letramento científico do público em geral, resolvi tirar vantagem da empolgação científica já suscitada pela grande mídia, quando anunciou a primeira imagem de um buraco negro. Não era mais preciso interessar as pessoas, pois elas já estavam interessadas no tema. Porém, notas quase telegráficas de jornais e noticiários atingem apenas superficialmente o público. Como teste de uma estratégia de divulgação científica e, também, como experimento de comunicação científica, decidi preparar e oferecer ao público um texto, antes de tudo elucidador do conteúdo científico e da complexa técnica de obtenção da imagem, mas também crítico do modo científico de investigar a natureza e incitador da aplicação da ciência, na medida em que ela possa tornar o mundo melhor e mais humano.

Abstract

Consider literally the expression “image of a black hole”, giving each word its usual meaning. You will see that it does not make much sense and, if it does, it sounds strange. The point is that the expression is scientific. Each word acquired meaning in a vast context of concepts articulated in a theory; these concepts, in turn, often have empirical laboratory or observational (in Astronomy) references; the normally unpredictable historical development of observational discoveries or intellectual creations, also adds to the words, not quite causal explanations, but mere casual references. Considering the importance of popularizing science, as a means of promoting the necessary scientific alphabetization and literacy of the general public, I decided to take advantage of the scientific excitement already aroused by the mainstream media, when it announced the first image of a black hole. There was no need anymore to interest people, as they were already interested in the topic. But notes almost telegraphic from newspapers and news reach the public only superficially. As a test of strategy for scientific outreach and also as an experiment in scientific communication, I decided to prepare and offer the public a text, first of all trying to clarify the scientific content and the complex technique of obtaining the image, but also being critical of the scientific way of investigating nature and inciting the application of science, insofar as it can make the world better and more human.

Palavras-chave: buraco negro, EHT, horizonte de eventos.

Keywords: black hole, EHT, event horizon.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31781](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31781)

1 Introdução

A notícia de que os astrônomos obtiveram, pela primeira vez, a imagem de um *buraco negro* foi anunciada em 10 de abril de 2019. Mas muitos de vocês já devem ter visto imagens de buracos negros em livros, revistas ou vídeos de Astrono-

mia anteriores a essa data. Então, porque tanta empolgação?

Todas imagens vistas antes eram meras concepções artísticas de ilustradores tentando representar o buraco negro, após ouvir de cientistas explicações teóricas envolvendo leis físicas e noções matemáticas, ou mesmo descrições observa-

cionais, não propriamente de um buraco negro que é invisível (não só na luz visível, mas em todos os comprimentos de onda do espectro eletromagnético), mas de algum indício em suas vizinhanças, como intensa emissão de raios X por matéria extremamente quente orbitando o buraco negro num *disco de acreção* (disco que alimenta o buraco negro com matéria), ou um *jato* longo e retilíneo de cargas elétricas aceleradas perpendicularmente ao disco de acreção, a velocidades próximas à da luz, ou ainda estrelas orbitando mais longe, porém, com velocidades orbitais estranhamente elevadas, que denunciam uma quantidade excessivamente elevada de matéria, própria de um buraco negro central. Para exemplificar, apresento abaixo (Figura 1) uma concepção artística de um buraco negro baseada em simulações computacionais.

A notícia da primeira imagem (Figura 8) foi oficialmente anunciada ao mundo, através de entrevistas coletivas dadas simultaneamente em Washington, Bruxelas, Santiago, Xangai, Taipé e Tóquio. A colaboração científica internacional *EHT* (Event Horizon Telescope) ou Telescópio Horizonte de Eventos, iniciada em 2009 e envolvendo 347 astrônomos, físicos, matemáticos e engenheiros de 60 instituições de 20 países, tinha conseguido captar pela primeira vez, por meio de um telescópio virtual do tamanho da Terra, formado por 8 radiotelescópios, a imagem do buraco negro supermassivo, com massa equivalente à de 6,5 bilhões de sóis¹ no centro da galáxia M87 (*Messier 87*) ou *Virgo A*, localizada a 53,5 milhões a.l.² de distância na constelação setentrional da *Virgem*. Morfologicamente M87 é uma galáxia elíptica³ super-gigante e ativa, que se destaca por ser a mais massiva do superaglomerado (ver adiante) da *Virgem* e uma das mais massivas em nossas proximidades. Ela exibe um estreito jato violáceo (Figura 2) com pelo menos 5 mil a.l. de comprimento, indicador de que se trata de uma galáxia ativa. O raio do *horizonte de even-*

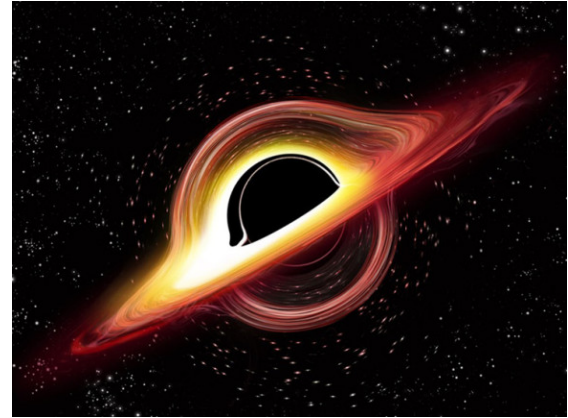


Figura 1: Desenhando o invisível. Ilustração considerada realista de um buraco negro supermassivo, com o disco de acreção posicionado quase de perfil. A parte frontal do disco aparece aqui com essa orientação, mas os fótons da parte traseira, tendo suas trajetórias recurvadas gravitacionalmente para cima, foram lançados na nossa direção. Há também alguns fótons com trajetórias recurvadas para baixo, sendo que uma parte também foi lançada na nossa direção, por isso aparecem na imagem.

*tos*⁴ do buraco negro é de 20 bilhões km (para os padrões astronômicos, uma distância modesta: apenas 0,002 a.l., lembrando que α do Centauro, a estrela mais próxima, se encontra a 4,4 a.l.). Considerando a distância já mencionada, o tamanho angular do horizonte de eventos é de apenas 0,000016" (16 milionésimos de 1"), um objeto de veras compacto.

1.1 Imagem impactante

Poucas imagens astronômicas, como aquela de 1990 do “pálido ponto azul” obtida pela sonda Voyager I (Figura 3), foram capazes de impactar tão profundamente o imaginário popular. A primeira imagem de um buraco negro também é impactante porque nos permitiu ver, pela primeira vez, o vulto de um buraco negro, um objeto do universo que achávamos ser definitivamente desprovido de qualquer visibilidade.

A teoria da relatividade geral, de Einstein, fun-

¹Doravante denotarei a massa do Sol com o símbolo $M_{\odot} = 1$ massa solar ≈ 2 oitilhões (2 seguido de 27 zeros) de toneladas.

²a.l. : abreviação de ano-luz. 1 a.l. corresponde à distância percorrida pela luz no vácuo durante um ano de 365 1/4 dias ou 9,461 trilhões km. É uma unidade de comprimento conveniente para expressar distâncias de estrelas e outras distâncias de escalas galácticas.

³Refere-se a essa forma que é diferente da de nossa Galáxia, que é espiral.

⁴Horizonte de eventos de um buraco negro sem rotação, é uma superfície perfeitamente esférica ao redor do buraco negro, de cujo interior nada pode ser observado por um observador externo pois, de lá, nem mesmo a luz pode escapar, devido à gravidade de extrema intensidade. Para um observador imaginário que adentrasse o horizonte de eventos, esse horizonte é o portal do não retorno. Lá dentro, todos os caminhos levam (e só levam) para o centro, onde toda massa do buraco negro está concentrada. O raio do horizonte de eventos é usado para definir o tamanho de um buraco negro.



Figura 2: Galáxia M87 (acima e à esquerda) com o jato de partículas relativísticas. O buraco negro supermassivo de que estamos falando está no centro dessa enorme galáxia. Fotocomposição de imagens na luz visível e em infravermelho do Telescópio Espacial Hubble. Crédito: NASA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Fonte: www.nasa.gov/feature/goddard/2017/messier-87.

damentou o conceito de buraco negro. Mas o próprio Einstein achou tal ente físico tão extravagante e monstruoso que, em 1939 pontificou que ele jamais existiria no mundo real. Seria apenas um conceito matemático. No entanto, obtida agora a imagem, pudemos constatar que o bizarro portal de mão única pelo qual só se entra, mas jamais se sai, realmente existe.⁵ Ele lembra a porta do Inferno da “Divina Comédia” com a inscrição: “Ó, vós que entrais, abandonai toda a esperança.”

A imagem nos mostrou como a gravidade e a relatividade geral de Einstein, de fato funcionam,

⁵Aqui um pequeno esclarecimento se impõe. Como um buraco negro não deixa nada escapar (nem luz!), afirma-se que ele só pode, ou manter a massa que já tem, ou ganhar mais massa, mas jamais perder. No entanto, aplicando-se a mecânica quântica (teoria estranha à relatividade geral), descobriu-se que buracos negros podem irradiar e, portanto, perder massa. Não conseguiria elucidar aqui com poucas palavras como isso ocorre, nem considero didático fazer isso neste momento, mas o processo de perda de massa é chamado evaporação do buraco negro. Ela é tanto mais intensa, quanto menor a massa, pois a temperatura do buraco negro é inversamente proporcional à massa. Em buracos negros microscópicos a evaporação é tão rápida que chega a ser explosiva. Já quando a massa é estelar, a radiação é lenta, praticamente imperceptível, demandando um tempo incomparavelmente maior que a idade do universo! Por isso, geralmente a evaporação nem é mencionada.



Figura 3: A Terra, um pálido ponto azul perdido no espaço (no centro do círculo amarelo). Esta imagem nos faz sentir ridículos quando levamos a sério as fronteiras que nos separam. Fonte: photojournal.jpl.nasa.gov/jpegMod/PIA23645_modest.jpg.

mesmo sob as condições de gravidade com intensidades mais extremas. A imagem não mostrou propriamente o buraco negro que, por sua própria natureza, é invisível. Se na natureza os buracos negros existissem isolados, em meio ao nada, seria praticamente impossível flagrá-los. Felizmente, buracos negros reais, via de regra encontram-se num ambiente com matéria e energia visíveis. No caso da imagem de M87* (o asterisco denota o buraco negro supermassivo da galáxia M87), indícios de uma concha envolvendo a *esfera de fótons* (ver adiante) parece constituir a evidência observacional mais contígua ao buraco negro.

Seria natural que o primeiro buraco negro supermassivo da lista de observação do projeto *EHT* fosse *Sagittarius A**, pois encontra-se na região central da nossa própria Galáxia, a 26 mil a.l. Visto daqui da Terra, ele se encontra no céu na constelação do Sagitário, ao norte da ponta da cauda do Escorpião. Em São Paulo, ele passa perto do zênite nas primeiras horas da noite em meados de agosto. Nessa região do céu há um complexo de fontes de ondas de rádio chamado *Sagittarius A*. *Sagittarius A** é uma rádio-fonte intensa e compacta desse complexo, correspondente ao buraco negro supermassivo da nossa Galáxia. O tamanho angular de seu horizonte de eventos visto da Terra é de 0,00002”. Embora muitíssimo mais próximo de nós do que M87, o tamanho angular de *Sagittarius A** é menor, mas

nem tanto, de modo que sob esse ponto de vista são comparáveis. A dificuldade maior para a observação de *Sagittarius A** é, ironicamente, o fato de que moramos no interior da Galáxia. Estamos junto a um dos braços espirais, assim toda a linha de visada para *Sagittarius A** atravessa o plano do disco galáctico onde a concentração de poeira interestelar obscurece a visão. Na luz visível, *Sagittarius A** permanece oculta atrás da poeira interestelar, problema que pode ser contornado, em parte, pela observação em ondas de rádio milimétricas, para as quais as nuvens de poeira são mais transparentes. Mas *Sagittarius A** também é um buraco negro quiescente, portanto a atividade que gera radiação e viabiliza a observação, não só é sempre menos intensa, como também intermitente, podendo deixar esse buraco negro inativo por prolongados períodos de tempo.

M87* era o segundo candidato da lista, que acabou ganhando preferência principalmente por ser, como já vimos, uma galáxia ativa.

1.2 Por que não um buraco negro estelar?

Buracos negros supermassivos têm massas entre milhões e bilhões M_{\odot} . Já buracos negros estelares têm algumas M_{\odot} . Assim, embora possam ser encontrados bem mais perto de nós, são muito menores, com horizonte de eventos tipicamente de algumas dezenas de quilômetros. Se o Sol fosse um buraco negro, ele teria um raio de 3 km. Portanto os buracos negros estelares são pequenos demais para a obtenção de uma imagem direta, mesmo com os maiores telescópios atuais. Imagens obtidas em comprimentos de onda mais favoráveis só nos mostram apêndices com alguma associação física, mas eles encontram-se relativamente afastados do horizonte de eventos. Uma das imagens mais recentes obtidas com o satélite *Chandra*⁶ da NASA mostra um par de lobos emitindo raios X. Esses lobos são diretamente ligados ao buraco negro de $8 M_{\odot}$ do sistema binário⁷ MAXI J1820+070, situado na constelação do Ofiúco a 10 mil a.l. Após atrair matéria da estrela companheira de $0,5 M_{\odot}$, o buraco negro

⁶Homenagem ao astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar, de quem falarei mais adiante.

⁷Num sistema binário de estrelas, duas estrelas orbitam ao redor do centro de massa comum. Quando uma dessas estrelas é um buraco negro estelar, a outra estrela geralmente de massa muito menor, orbita ao redor do buraco negro e ainda transfere para ele sua própria matéria através de um disco de acreção.

ejetou em datas diferentes jatos a 80% da velocidade da luz que formaram os lobos de raios X, que também foram observados em ondas de rádio. Mas a imagem em raios X mostra apenas os dois lobos.

Outro buraco negro estelar que também tem imagem com dois lobos em raios X observado pelo satélite *Chandra* é SS 433. Há também imagem dos lobos obtidas com rádio-interferômetros. A radiação X se origina de um plasma aquecido a 50 milhões K. Os lobos de alta velocidade são ejetados pelo sistema binário com buraco negro de $16 M_{\odot}$ e companheira de $2 M_{\odot}$. O sistema encontra-se na constelação da *Águia* a 18 mil a.l.

Recentemente se descobriu que há buracos negros estelares também em aglomerados globulares de estrelas. Tais aglomerados são conjuntos populosos com centenas de milhares a milhões de estrelas, que assumem forma esférica. Nossa Galáxia tem cerca de 150 aglomerados globulares distribuídos mais ou menos homoganeamente por todo o *halo*⁸ galáctico. A descoberta foi reivindicada em 2007 no aglomerado NGC 6397 da nossa Galáxia. Parece que, com o tempo, esses buracos negros se fundem e tendem a se sedimentar na região central do aglomerado dando lugar, talvez, a buracos negros de massa intermediária entre um buraco negro estelar e um buraco negro supermassivo.

2 Rejeição de Einstein aos buracos negros

Começo aqui a elucidar o conceito de buraco negro. Trata-se de uma expressão amplamente popularizada, porém, divulgada e entendida geralmente de forma bem superficial. Particularmente se o objetivo é didático, uma elucidação minimamente significativa só é possível no contexto da Física e da Astronomia, mas esse contexto de objetividades precisa ganhar um enquadramento humano de subjetividades. Por isso mesmo, não deixarei de apresentar também o contexto histórico em que essas ideias surgiram, foram elaboradas, depois colocadas à prova, criti-

⁸As *galáxias espirais* (como a Via Láctea) geralmente têm um *bojo* central mais denso de estrelas, circundado por um *disco* plano com os braços espirais, onde estrelas orbitam ao redor do núcleo galáctico. No disco da maioria das galáxias espirais (inclusive na Via Láctea) costuma haver ainda uma estrutura em forma de *barra* que passa pelo centro. Todo esse conjunto ainda é envolto por um tênue *halo* esférico.

cadadas ou tidas como comprovadas. O contexto histórico revela como nós, humanos, construímos o conhecimento. Com a história aprendemos, por imitação, o pensar e o agir científico e o entendimento adequado dos conceitos científicos. Minha expectativa é que a presente elucidação torne a primeira imagem do buraco negro verdadeiramente significativa para o leitor.

2.1 Teoria da relatividade geral

A relatividade geral, publicada por Einstein em novembro de 1915, consistiu numa reformulação da teoria universal da gravitação de Newton, de 1687. Segundo Newton, cada corpo exercia uma força de atração sobre outro corpo segundo a lei que todos aprendemos de cor: matéria atrai matéria... Essa atração - gravidade - era exercida instantaneamente, sem nenhum retardo temporal. Também era exercida a distância, sem nenhum contato físico direto. Newton jamais explicou no quê consistia essa força. Entretanto, quando a usava nas equações, estas descreviam com precisão os fenômenos observados, tais como os movimentos planetários, as marés etc.

Einstein, partiu de pressupostos diferentes. Para começar, enquanto o tempo e o espaço de Newton eram independentes e cada um deles era absoluto (isto é, suas medidas independiam do observador), para Einstein a medição do tempo e do espaço dependia do estado de movimento do observador (daí se falar em contração do espaço e dilatação do tempo). Ele criou uma nova entidade, uma estrutura contínua permeando todo o universo denominada *espaço-tempo*, entrelaçando tempo e espaço. O espaço-tempo tinha quatro dimensões, pois associava as três dimensões do espaço à dimensão única do tempo. O espaço-tempo não era relativo, mas absoluto. Na relatividade geral, Einstein ainda facultou que o espaço-tempo pudesse ser deformado, ou encurvado, à semelhança da rede de uma cama elástica sob o peso de um ginasta. Explicando a relatividade geral de forma gráfica, o físico teórico norte-americano John A. Wheeler (1911-2008) dizia que a matéria ditava como o espaço-tempo devia se curvar, enquanto o espaço-tempo determinava como a matéria devia se movimentar. Podemos visualizar isso se considerarmos as trajetórias de uma bolinha de gude atirada ao redor de uma bola de boliche que tenha deformado a rede de uma cama elástica. Esta atuação da gravidade

segundo a relatividade geral é completamente diferente daquela segundo a gravitação universal de Newton.

A grande vantagem e superioridade da relatividade geral é que ela explica todos os movimentos, em todos os campos gravitacionais. A teoria de Newton só se aplica aos movimentos com baixas velocidades e em campos gravitacionais estáticos e fracos. Altas velocidades são aquelas que se aproximam da velocidade da luz, cerca de 300 mil km/s. Campos gravitacionais intensos são, por exemplo, aqueles encontrados na superfície de estrelas extremamente densas como as chamadas *estrelas de nêutrons*, com 100 milhões de toneladas por centímetro cúbico (a densidade média do Sol é apenas 1,4 g/cc). A teoria de Newton só se aplica a corpos que têm massa, enquanto a relatividade geral se aplica também à luz, constituída de fótons que são desprovidos de massa.

2.2 A solução de Schwarzschild

Quando publicou a relatividade geral, Einstein apresentou o resultado de dez anos de estudos consubstanciado nas chamadas equações de campo para as quais, sendo altamente complexas, ele apresentou apenas soluções aproximadas. Mas o talentoso astrônomo alemão tanto em problemas teóricos, quanto práticos, Karl Schwarzschild (1873-1916), estava a par da nova teoria de Einstein e foi um dos primeiros a reconhecer sua importância. Ele já tinha sido diretor de dois observatórios. Sendo também um patriota, ao eclodir a I Guerra Mundial se alistou no exército alemão. Depois de ter servido nas frentes belga e francesa, quando estava na frente russa, apesar das condições adversas, foi o primeiro a procurar uma solução exata para as equações de campo. Para isso concebeu a situação simplificada de uma estrela sem rotação, esfericamente simétrica, com massa não muito grande, nem muito concentrada no centro. Longe da estrela, sua solução para a geometria do espaço-tempo equivalia ao campo gravitacional predito pela teoria de Newton. Mais perto da estrela, onde o campo gravitacional era mais intenso, surgiram diferenças que, todavia, não chegavam a ser chocantes.⁹ Schwarzschild comunicou sua solução, hoje conhecida como solução de Schwarzschild, a Einstein que ficou muito

⁹Uma dessas diferenças é um avanço adicional do perélio do planeta Mercúrio, inexplicável pela teoria de Newton, mas explicada pela teoria de Einstein.

admirado, pois ele não acreditava que alguém pudesse obter uma solução exata em tão pouco tempo.

Mas, semanas depois, ainda antes do Natal de 1915, Schwarzschild retornou a Einstein alertando-o de que a solução exata implicava um horizonte de eventos e, no seu centro, residia uma *singularidade* esdrúxula e inquietante em que a massa poderia se concentrar infinitamente tornando a gravidade e o encurvamento do espaço-tempo infinitos. Nascia o conceito moderno de buraco negro.

O horizonte de eventos era esférico e tinha um raio, hoje chamado *raio de Schwarzschild*, $R_S = 2GM/c^2$. Notar que esse raio é proporcional à massa M da estrela, já que G e c são constantes físicas (respectivamente a constante gravitacional e a velocidade da luz no vácuo). Na superfície do horizonte de eventos a velocidade de escape era igual à velocidade da luz. Fora dela, a velocidade de escape era menor que a velocidade da luz, mas dentro dela ela era maior. Como nada se move mais velozmente que a luz, do interior do horizonte de eventos nada poderia escapar, nem mesmo a luz. Tanto a luz como qualquer coisa poderia ingressar através do horizonte de eventos, mas, jamais sair. Esse horizonte seria absolutamente escuro. Nós, daqui de fora, nada poderíamos ver, nem saber do que ocorresse além do horizonte de eventos, o que justifica o nome. Nesse sentido o horizonte de eventos desconectava causalmente o seu interior do resto do universo. Por outro lado, tudo o que ingressasse através do horizonte de eventos seria inelutavelmente sequestrado pela singularidade, o poço sem fundo de gravidade infinita.

Embora toda a matéria esteja concentrada no centro, o raio do que hoje denominamos buraco negro é definido como sendo R_S , o raio de Schwarzschild. Qualquer quantidade de massa, mesmo modesta, uma vez comprimida numa esfera igual ou menor que o horizonte de eventos, formaria no centro da esfera uma singularidade e se tornaria um buraco negro. O Sol, por exemplo, poderia se tornar um buraco negro: mantida a sua massa, o seu raio atual de 700 mil km deveria ser reduzido a apenas 3 km. Da mesma forma a Terra se tornaria buraco negro com 9 mm e a Lua, com 0,1 mm.

Em suma, a singularidade central envolta numa esfera chamada horizonte de eventos constitui a

estrutura geométrica do espaço-tempo para a situação simplificada de um buraco negro sem rotação.

Até mesmo Einstein, de mente aberta, considerou a solução envolvendo uma singularidade, um resultado meramente matemático, sem correspondência com nenhuma entidade do mundo real. Afinal, densidade infinita é algo imensurável, portanto fisicamente inacessível e, portanto, sem direito a existir. Mas, de qualquer forma, usando premissas da relatividade geral, Schwarzschild já tinha colocado uma situação hipotética que se tornaria um dos testes mais severos da relatividade geral: poderia a singularidade se materializar? Os que não conseguiam se livrar da dúvida passaram a indagar se haveria na natureza algum mecanismo físico capaz de produzir uma singularidade. Como, na época, nenhum mecanismo era conhecido, por um bom tempo essa questão permaneceu no limbo.

Na frente russa Schwarzschild já tinha contraído uma doença autoimune rara e grave. Mesmo assim, em fevereiro de 1916 apresentou uma segunda solução para as equações de campo de Einstein, supondo desta vez uma estrela esférica sem rotação, com densidade de matéria constante. Por ser esta uma distribuição de matéria irrealística, essa solução não recebeu atenção. Em março de 1916 Schwarzschild voltou da Guerra para se tratar em casa. Mas acabou falecendo em maio desse mesmo ano.

Mais de duas décadas depois, em 1939, Einstein ainda se deu ao trabalho de publicar seus estudos tentando demonstrar que os buracos negros com a singularidade de Schwarzschild não poderiam existir. Para isso usou sua própria relatividade geral, o que é considerado irônico porque essa mesma teoria é usada atualmente para argumentar que os buracos negros não apenas são possíveis, senão também necessários para explicar vários objetos astronômicos. Einstein argumentou que as leis físicas deveriam interditar a existência dos buracos negros, possivelmente pela ameaça que eles lhe pareciam representar a princípios bem estabelecidos, por exemplo, como ficaria a conservação da matéria e da energia se tudo que cai no horizonte de eventos é perdido definitivamente? A argumentação era engenhosa, porém falha na medida em que Einstein invariavelmente pressupunha a atuação de algum agente

físico que impedia o *colapso gravitacional*,¹⁰ ao invés de admitir uma contração gravitacional totalmente desimpedida, que sobrepujasse quaisquer outras forças, causando uma verdadeira implosão catastrófica (colapso gravitacional) capaz de dar origem a um buraco negro. Uma verdadeira “conversão mental” ainda se fazia necessária para que a formação de buracos negros não fosse interdita pelas leis físicas. Todavia, ainda hoje não é consensual a aceitação dos buracos negros como entidades do mundo real [1].

3 Buracos negros estelares

Já desde 1935 os astrofísicos que estudavam a estrutura e evolução das estrelas vislumbravam a possibilidade de um real colapso gravitacional depois que uma estrela suficientemente massiva (estimativamente com mais de $8 M_{\odot}$) exaurisse seu *combustível nuclear*.¹¹ Não sendo uma estrela suficientemente massiva, após o esgotamento do combustível nuclear seu interior se esfriaria, mas a contração gravitacional seria freada para dar lugar a uma densa *anã branca* ou a uma *estrela de nêutrons* ainda mais densa. No caso de anãs brancas a contração seria freada pela pressão de um gás de elétrons fortemente compactado (efeito bizarro previsto pela mecânica quântica) e, no caso de estrelas de nêutrons, pela pressão de um gás de nêutrons fortemente compactado. Mas numa estrela com maior massa, não existindo na natureza nenhum outro tipo de matéria capaz de se contrapor à contração gravitacional, toda matéria fluiria através do horizonte de eventos. Então

¹⁰Estrelas em condições de equilíbrio, que não estejam nem colapsando, nem explodindo, encontram-se em equilíbrio hidrostático. A matéria de que são formadas se sedimenta pela ação da gravidade, mas o colapso gravitacional é impedido porque uma força igual, atuando no sentido oposto, cancela localmente a gravidade estabelecendo o equilíbrio hidrostático. A força que se opõe à gravidade se origina da pressão da própria matéria estelar. De forma análoga se estabelece o equilíbrio hidrostático da atmosfera da Terra. Mas, em situações em que a natureza se torna incapaz de oferecer qualquer força que se oponha à gravidade, o colapso gravitacional é inexorável.

¹¹Designação popular dada aos elementos químicos que geram energia nas estrelas através de reações de fusão nuclear. A energia que o Sol irradia provém de reações de fusão em que 4 núcleos de hidrogênio se fundem em um núcleo de hélio. Nesse caso o hidrogênio é o combustível, mas esse nome não é adequado na medida em que é tradicionalmente usado para reações químicas, mas nas estrelas as reações são nucleares.

a gravidade imperaria absoluta sem que o colapso gravitacional pudesse ser sustado, tornando compulsório o surgimento da singularidade. Pela importância que tiveram nestes estudos, não posso deixar de mencionar aqui o astrofísico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar (1910-1995), o físico norte-americano Robert Oppenheimer (1904-1967) e o físico russo George M. Volkoff (1914-2000) pelas contribuições que deram início à lenta conversão mental que ainda teria que esperar a chegada da década de 1960.

Nessa década os físicos teóricos ingleses, Stephen Hawking (1942-2018) e Roger Penrose (1931-) demonstraram matematicamente (diria, axiomáticamente) que as singularidades, longe de serem raras, seriam objetos cósmicos ordinários, resultantes da evolução natural de estrelas massivas depois de esgotarem seu combustível nuclear. Mas singularidade ainda hoje é um conceito controverso. Não poucos afirmam que trata-se de um ente de razão sem contrapartida no mundo real. Nesse sentido, o colapso gravitacional parece ser real mas, talvez não o desfecho final numa singularidade. Não entrarei nesta discussão.

O citado Wheeler, quando ouviu falar de colapso de estrelas em 1939, achou essa ideia ridícula. No entanto, quando ele próprio aplicou a relatividade geral a estrelas “terminais”,¹² chegou também à conclusão de que o colapso gravitacional de estrelas com massa superior a um certo valor crítico até a singularidade seria inevitável. Por volta de 1967, para facilitar as palestras que dava, ele cunhou a expressão *buraco negro* que, não só “pegou” entre os cientistas, mas também se popularizou. Com efeito, o horizonte de eventos é realmente negro, pois dele nada sai, nem mesmo a luz; e trata-se, de fato, de um buraco no sentido de que ali tudo cai num abismo infinito, mas nada sai.

Buracos negros estelares, isto é, com massa típica de uma estrela, devem se formar quando estrelas solitárias com mais de cerca de $8 M_{\odot}$, após o término das reações de fusão nuclear, têm seu interior resfriado e, assim, perde autossustentação e colapsa indefinidamente, até que se concentre num ponto com densidade infinita. Surge tecnicamente uma *singularidade*. Buracos negros de 5 a algumas dezenas de M_{\odot} ¹³ devem se for-

¹²Expressão utilizada para designar estrelas que esgotam seu combustível nuclear, pois tornam-se incapazes de irradiar luz própria.

¹³Observações recentes de emissão de ondas gravitacio-

mar na etapa terminal de estrelas solitárias, em que o colapso é acompanhado de uma violentíssima explosão estelar conhecida como *supernova*. Mais recentemente o colapso tem sido observado também por meio de satélites que detectam as chamadas *erupções de raios gama*.

Mas, *buracos negros estelares* também podem se formar em sistemas binários com duas estrelas bem próximas orbitando o centro de gravidade comum, em que uma gigante ou super-gigante “estufada” (pouco densa) transfere parte de sua massa para a companheira mais densa, por exemplo, uma anã branca – estrela com massa aproximadamente igual à do Sol, mas compactada ao tamanho da Terra, portanto com densidade média próxima de 1 ton/cc. Ao adicionar massa nessa companheira além do valor crítico de 1,4 vezes a massa do Sol (*limite de Chandrasekhar*), essa estrela colapsa gravitacionalmente, isto é, desaba sobre si mesma, ocasionando também uma súbita explosão de supernova.

Mas o produto final do colapso pode também ser uma estrela de nêutrons, na qual a alta compressão “funde” prótons e elétrons em nêutrons, os quais ainda são capazes de frear o colapso e sustentar uma estrela, desde que não exceda cerca de $2 M_{\odot}$ contidas numa esfera com raio de poucas dezenas de quilômetros. A densidade média atinge o espantoso valor de cerca de 500 milhões ton/cc. Se, porém, o limite de massa acima for ultrapassado, o produto final será um buraco negro com massa superior a cerca de $5 M_{\odot}$.

3.1 Descoberta

Na década de 1960, admitindo que buracos negros estelares deveriam existir, físicos e astrônomos começaram a se perguntar como poderiam procurar evidências deles no céu. Várias ideias surgiram. Uma ideia promissora foi proposta em 1964 pelo físico soviético Yakov Zeldovich (1914-1987) e, independentemente, também pelo astrofísico da Universidade Cornell, Edwin Salpeter (1924-2008): observar sistemas estelares binários em que uma das estrelas fosse um buraco negro e a outra, uma estrela normal, por exemplo, uma gigante ou super-gigante. O buraco negro obviamente não seria observado, mas a companheira seria visível e sua matéria estaria sendo transferida para o buraco negro.

Outro fenômeno previsto pela relatividade geral, revelaram a existência de buracos negros estelares com massa de até 25-30 M_{\odot} .

rida para o buraco negro. Ao redor do buraco negro e fora do seu horizonte de eventos deveria haver um disco de acreção, um rodamoinho plano de gás e poeira, através do qual matéria da estrela companheira seria transferida para o buraco negro. No disco de acreção, a matéria espiralaria com diferentes velocidades rotacionais próximas à da luz que, com o atrito, atingiria temperaturas tão elevadas que emitiria raios X. Assim o buraco negro invisível seria denunciado pelos raios X emitidos pelo disco de acreção e pela luz visível da estrela companheira orbitando com velocidade anormalmente elevada, mas compatível com uma grande massa de um buraco negro. A acreção de matéria era o ingrediente importante para a detecção do buraco negro.

Entretanto, um sistema binário com uma estrela de nêutrons no lugar de um buraco negro, poderia também ter um disco de acreção emitindo raios X e uma estrela visível. Mas essa ambiguidade podia ser eliminada determinando-se a massa do candidato a buraco negro, que deveria ser maior que $2 M_{\odot}$. Em princípio essa massa pode ser determinada ou, ao menos, estimada analisando-se os efeitos gravitacionais do objeto compacto na estrela visível.

Em 1961, premidos pela corrida nuclear com os soviéticos, os americanos decidiram que deveriam ser capazes de fazer no espaço medições de raios X, raios gama e partículas de alta energia produzidos por explosões nucleares e, assim, monitorar os testes das futuras bombas soviéticas. Nesse contexto a Força Aérea dos Estados Unidos implantou um programa intensivo, no qual várias medições foram ensaiadas com sucesso a bordo de foguetes e satélites. Daí resultou a construção de um sensível detector de raios X para uso astronômico, que voou em 1962 a bordo de um foguete para medir experimentalmente raios X da Lua. Surpreendentemente os raios X detectados eram muito mais intensos do que os esperados e provinham não da Lua, mas da direção da constelação do Escorpião. Dois meses depois, os autores do experimento anunciaram a detecção da primeira fonte celeste de raios X,¹⁴ 5 mil vezes mais intensa do que os astrofísicos tinham predito. Posteriormente essa fonte foi denominada *Sco X-1* (*Sco* é abreviação de Escorpião em latim e X-1 denota a fonte mais brilhante de raios X localizada nessa constelação). Mas, para confirmar se *Sco X-1* e

¹⁴Claro, raios X solares já tinham sido detectados antes.

outras fontes de raios X que viriam a ser descobertas, eram sistemas binários com buracos negros ou estrelas de nêutrons, os detectores ainda tinham que ser aprimorados, principalmente para fornecer a posição das fontes no céu com maior precisão. Vários experimentos ainda foram feitos em voos de foguetes que culminaram no primeiro satélite para a astronomia de raios X denominado *Uhuru* (“Liberdade” em suaíli), lançado no Quênia no final de 1970 e que gerou um catálogo com 339 fontes. Num voo de foguete de 1964, a fonte *Cyg X-1* foi descoberta na constelação do *Cisne*, sendo uma das mais intensas no céu. Ela faz parte do sistema binário que se encontra na nossa Galáxia, a cerca de 6 mil a.l. Um dos objetos mais estudados de sua classe, observado em raios X e na luz visível, estima-se que o objeto compacto e invisível tenha uma massa de $15 M_{\odot}$, gire 800 vezes por segundo e que o raio do horizonte de eventos não ultrapasse 300 km. Por isso, desde a década de 1970 o objeto compacto tem sido amplamente aceito como um buraco negro estelar. A estrela companheira é uma super-gigante azul de cerca de $9 M_{\odot}$, denominada HDE 226868 que orbita o buraco negro com período de 5,6 dias, a uma distância de cerca de 0,2 u.a..¹⁵

Há outros buracos negros estelares pertencentes a sistemas binários que emitem raios X, mas ainda não passam de poucas dezenas. Na maioria são da nossa Galáxia, mas há alguns extragalácticos. Os buracos negros estelares, na sua maioria, devem ser solitários, mas estes são de difícil detecção. Assim, os pertencentes a sistemas binários, embora constituam minoria, podem ser detectados mais facilmente. Quanto a *Sco X-1* concluiu-se que se trata de um sistema binário cujo objeto compacto não é um buraco negro, mas uma estrela de nêutrons com cerca de $1,4 M_{\odot}$ e a estrela companheira tem apenas $0,42 M_{\odot}$.

Se discos de acreção de buracos negros podem ser observados através de raios X, portanto, através de ondas eletromagnéticas, a fusão de buracos negros passou a ser observada recentemente através de *ondas gravitacionais*¹⁶ captadas por *interferômetros de ondas gravitacionais*. Esta é uma técnica observacional baseada na relatividade

geral, que já vinha sendo ensaiada há décadas, mas só mostrou resultados concretos recentemente. Não caberia me estender aqui sobre essa técnica, mas ela é promissora para ajudar a esclarecer como os buracos negros podem colidir, fundir e crescer, talvez formando até mesmo os buracos negros supermassivos, processo esse que pode desempenhar um papel vital na formação e evolução do universo.

3.2 Estrela congelada

Na década de 1960 os buracos negros estelares eram chamados *estrelas congeladas* na União Soviética. Isso não denotava baixas temperaturas, mas a paralisação dos movimentos. Essa denominação não “pegou”, mas tem um valor didático que pode ser explorado. Caso o buraco negro não tenha rotação, a singularidade encontra-se envolta numa superfície perfeitamente esférica chamada horizonte de eventos. Qualquer objeto no interior do horizonte está fadado a colapsar na singularidade e não poderá jamais escapar para fora do horizonte. Mas, observando esse horizonte do lado de fora e de longe, como nós fazemos, pelo fato de que lá a gravidade é muito intensa, o tempo para um corpo que ali cai sofre dilatação em relação ao nosso tempo, ou seja, vemos os relógios lá marcharem mais devagar. O fator de dilatação cresce quanto mais se aproxima do horizonte, onde a dilatação torna-se infinita. Do nosso ponto de vista, a radiação lá passa a vibrar mais lentamente (a frequência diminui), os movimentos ficam quase parados e, por essa razão, os físicos soviéticos chamavam os buracos negros de *estrelas congeladas*. O congelamento total ocorreria no *horizonte de eventos*. Mas, na prática não chegaríamos a ver essa situação porque a radiação, à medida que vibra cada vez mais devagar, vai ficando sem energia e, então, as *estrelas congeladas* apagariam. Talvez por isso a expressão “não pegou”.

4 Buracos negros supermassivos

Se os buracos negros estelares resultam do colapso gravitacional de estrelas e, por isso mesmo, têm tipicamente algumas M_{\odot} , já os buracos negros supermassivos têm milhões até dezenas de bilhões de M_{\odot} . Eles se encontram no centro de galáxias.

¹⁵u.a.: unidade astronômica = distância média da Terra ao Sol = 150 milhões km

¹⁶Tais ondas, causadas por fenômenos gravitacionais violentos, como a colisão entre dois buracos negros, deformam a estrutura flexível e elástica do espaço-tempo e se propagam por todo o universo.

Vimos que R_S é diretamente proporcional à massa do buraco negro e que para $1 M_\odot$ esse raio mede 3 km. Dividindo $1 M_\odot$ pelo volume de uma esfera com raio de 3 km, obtemos a incrível densidade de 10 bilhões ton/cc para um buraco negro estelar. Para um buraco negro supermassivo de 1 milhão ou 10 bilhões de M_\odot , R_S é, respectivamente, 3 milhões de km (pouco mais que 2 diâmetros solares) ou 30 bilhões de km (5 vezes a distância de Plutão ao Sol). Notar que, astronomicamente, não são distâncias grandes. A densidade para os buracos negros supermassivos é surpreendentemente baixa, respectivamente, 17,5 kg/cc e 0,0002 g/cc (para comparação, a densidade da água é 1 g/cc), o que mostra que alta densidade da matéria não é característica fundamental dos buracos negros.

4.1 Galáxias

Mas se os buracos negros supermassivos encontram-se, em geral, no interior de galáxias, o que são galáxias? Galáxias são vastos conjuntos de milhões a trilhões de estrelas que se mantêm unidas pela gravidade. O espaço que fica entre as estrelas, chamado meio interestelar, não é totalmente vazio, mas contém nuvens com gases e diminutos grãos de poeira, campo magnético, além de ser atravessado por intenso fluxo de raios cósmicos, partículas subatômicas que se movem com velocidades próximas à da luz.

Atualmente se acredita que praticamente todas as galáxias abrigam um buraco negro supermassivo em seu interior. Mas essa ideia só se impôs nas últimas décadas do final do século passado, já de posse de evidências sólidas de que a nossa própria Galáxia, a Via Láctea, abrigava *Sagittarius A** com 4,3 milhões M_\odot .

Observando fundo o universo, estimamos que nele podem ser observados uns 2 trilhões de galáxias, a distâncias que vão até cerca de 46 bilhões a.l. O leitor poderá estranhar tal distância, considerando que a idade do universo é estimada em 13,8 bilhões de anos e a luz não pode ter viajado mais que esse tempo, mas é preciso levar em conta que o universo está em expansão, portanto a distância de galáxias distantes deve incluir o afastamento adicional devido à expansão ocorrida desde que essas galáxias passaram a existir.

Mais de 2/3 de todas as galáxias são espirais, como a Via Láctea. Sua matéria luminosa (estrelas, gás e poeira) se distribui em braços espirais

como num rodaminho. Mas há também *galáxias elípticas* com formato de esfera com variados graus de achatamento, ou de alongamento, como de um charuto, além de *galáxias lenticulares* (com forma de lente, entre espiral e elíptica) ou com morfologia irregular (exemplo, as Nuvens de Magalhães). As maiores galáxias são elípticas, chamadas *galáxias elípticas gigantes* ou *super-gigantes*. Podem ter até um trilhão de estrelas e medir 2 milhões a.l. Mas elas também podem ser pequenas. Nesse caso são chamadas *galáxias elípticas anãs*. As galáxias elípticas abrigam muitas estrelas velhas, pouco gás e poeira. Consequentemente, nelas são poucas as estrelas jovens.

Devemos entender as galáxias como unidades básicas constituintes do universo. Elas são como os tijolos da estrutura do universo.

4.2 Aglomerados e superaglomerados de galáxias

Embora galáxias sejam, em si, estruturas gravitacionalmente ligadas, geralmente elas fazem parte de associações maiores denominadas grupos, aglomerados e superaglomerados. Através da atração da gravidade atuando em escalas cada vez maiores, as galáxias formam estruturas hierarquicamente maiores. Os superaglomerados formam filamentos e paredes. Estas últimas se encontram separadas umas das outras deixando imensos vazios, dando lugar à estrutura de espuma. A partir dos superaglomerados a ligação gravitacional se enfraquece e a expansão do universo se torna aparente.

Nossa Via Láctea, com diâmetro visível de 150 mil a.l., na companhia de algumas dezenas de outras galáxias vizinhas (Nuvens de Magalhães e Andrômeda, por exemplo), forma o *Grupo Local* com cerca de 10 milhões a.l. Mas o Grupo Local, na companhia do vizinho *Aglomerado da Virgem* (assim chamado porque, daqui da Terra é visto na constelação da *Virgem*), faz parte do *Superaglomerado da Virgem* com cerca de 100 milhões a.l.

Estudos mais recentes numa amostra de 8 mil galáxias, analisando o movimento de cada uma delas com o objetivo adicional de determinar a distribuição espacial da *matéria escura* (ver adiante), mostraram o fluxo coletivo dessas galáxias e que o Superaglomerado da Virgem não passa, na verdade, de uma estrutura periférica pertencendo

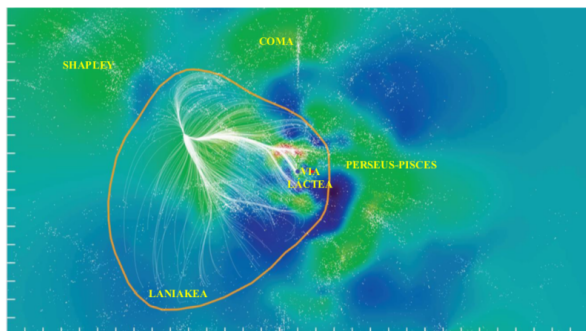


Figura 4: Laniakea, nosso superaglomerado local e seus superaglomerados vizinhos. Este mapa cobre uma extensão de cerca de meio bilhão a.l. A bolinha azul indica a posição da Via Láctea num “subúrbio” de Laniakea. Verde indica alta concentração de galáxias e azul, baixa concentração. Em branco, o fluxo de galáxias para a região de alta concentração. Figura legendada pelo autor. Fonte: www.nsf.gov/news/mmg/mmg_disp.jsp?med_id=78240.

cente a um superaglomerado ainda maior, de 100 mil galáxias e com mais de meio bilhão a.l. que foi chamado *Laniakea*, “céus incomensuráveis” em havaiano (Figura 4). A matéria escura promoveu uma revisão teórica nos modelos de estruturação do universo e uma revisão observacional no mapeamento dos aglomerados e superaglomerados de galáxias. Em seu constante movimento coletivo, como numa dança, as galáxias têm oportunidade de interagir gravitacionalmente com a matéria escura, denunciando assim como esta, que é invisível, se distribui no espaço. Grandes aproximações entre galáxias, com fortes interações gravitacionais entre elas (efeito de maré) têm sido observadas e revelam que não são tão infrequentes. Quando ocorrem, causam deformação nas galáxias, induzem formação explosiva de novas estrelas e até mesmo rupturas com intercâmbio de matéria ou fusão.

4.3 Matéria escura e formação de galáxias

A matéria escura foi mencionada acima e segue aqui um breve esclarecimento. Nas últimas décadas do século passado se deu conta de que a matéria ordinária,¹⁷ esta que forma o nosso corpo, assim como os planetas, estrelas etc., contribui com apenas 5% na composição do universo, enquanto 24% consistem em matéria escura e 71% em energia escura. As duas últimas componentes escuras são assim chamadas por serem invisíveis. Da matéria escura apenas se tem evidência

¹⁷Designação geral para a matéria feita de átomos, constituída majoritariamente de prótons e nêutrons.

de sua existência analisando-se, por exemplo, o movimento de galáxias em seus aglomerados ou no contexto da expansão do universo, ou o movimento orbital de estrelas em galáxias. Sabemos assim que a matéria escura existe, mas não sabemos qual é a sua natureza.

Mas os cosmólogos já especulam que a matéria escura rapidamente teria formado andaimes cósmicos no universo primordial. Por sua vez a matéria ordinária, atraída pela gravidade onde o ajuntamento da matéria escura era maior, pôde se acumular e formar as primeiras galáxias quando o universo tinha cerca de 400 milhões de anos. Mas ainda não se sabe ao certo como as primeiras galáxias se formaram, se já nasceram como um ajuntamento de um grande número de estrelas, ou crescendo progressivamente pelo ajuntamento de pequenos aglomerados de estrelas.

4.4 Descoberta de buracos negros supermassivos

Diferentemente dos buracos negros estelares, nenhum teórico predisse a existência de buracos negros supermassivos. É que não existe objeto com tamanha massa que possa colapsar gravitacionalmente de uma vez só. Assim, era mesmo de se esperar que a descoberta de buracos negros supermassivos fosse fortuita.

4.5 Saggiarius A*, o buraco negro supermassivo da nossa Galáxia

Assim como a descoberta dos buracos negros estelares esteve ligada ao início da astronomia de raios X, a descoberta dos buracos negros supermassivos esteve ligada ao início da radioastronomia. O engenheiro Karl Jansky (1905-1950) trabalhava na Bell Telephone Laboratories em Holmdel, NJ. Em 1932 ele foi encarregado de estudar um ruído que prejudicava as comunicações telefônicas com a Europa que eram, então, transmitidas por ondas de rádio.

Com uma antena construída especialmente para essa finalidade (Figura 5), Jansky descobriu que uma parte do ruído estático era gerada por descargas elétricas de tempestades. Mas, mesmo quando não havia tempestades, restava um ruído residual que em 1935 Jansky reconheceu vir da região central da Via Láctea. Assim, de forma inopinada, foi feita a primeira observação de uma fonte cósmica em ondas de rádio. A frequência

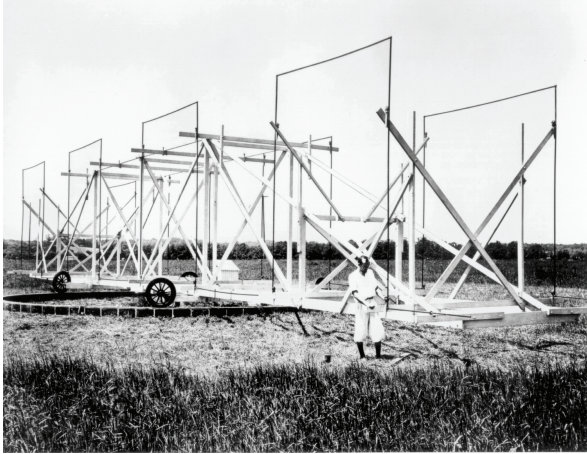


Figura 5: Com o “Carrossel de Jansky” – apelido que recebeu sua antena, o “pai da radioastronomia” presente na foto descobriu em 1933 que ondas de rádio em 20,5 MHz vinham do centro da nossa Galáxia. Crédito: NRAO/AUI/NSF. Fonte: public.nrao.edu/gallery/karl-jansky-and-his-merryground/.

era de 20,5 MHz. Apesar da publicidade dada pela Bell, mesmo astrônomos foram pouquíssimos que deram atenção ao fato. Incrivelmente a maioria deles permaneceu calada no seu conservadorismo, pois as teorias da época não previam mecanismos de rádio-emissão na Via Láctea. O próprio Jansky chegou a projetar um radiotelescópio parabólico de 30 m para melhor estudar esses sinais cósmicos, mas os superiores da Bell, mal impressionados com a esquivia dos astrônomos, o desencorajaram e ele abandonou o projeto. Hoje vemos em retrospecto que o rádio-sinal cósmico inaugural vinha exatamente da região da Galáxia que, hoje sabemos, abriga o buraco negro supermassivo *Sagittarius A**!

4.6 *Cyg A*, a primeira rádio-galáxia

Quem acabou se interessando pela descoberta radioastronômica de Jansky foi o radioamador e astrônomo amador Grote Reber (1911-2002) de Wheaton, IL. Usando suas habilidades manuais e seus recursos pessoais, construiu no jardim de sua mãe uma antena de 9 m que operou em 160 MHz (Figura 6). Com ela elaborou em 1939 um rádio-mapa do céu que indicava, além da fonte do centro da nossa Galáxia, a rádio-fonte hoje conhecida como *Cyg A* (A, a primeira letra do alfabeto denota a rádio-fonte mais intensa da constelação do *Cisne*). Mas Reber, descrito como pessoa extremamente retraída, trabalhou sozinho como radio-astrônomo amador na elaboração do rádio-mapa,



Figura 6: O radiotelescópio de 9 m de Grote Reber em 1937. Fonte: NRAO/AUI, www.flickr.com/photos/itu-pictures/16660555401.

embora tivesse recebido convite de universidade.

Para que as descobertas radioastronômicas começassem a fazer sentido e contribuíssem para ampliar o conhecimento do universo, era necessário estabelecer alguma correspondência entre as rádio-fontes e os objetos observados na luz visível. Os astrônomos, em geral, estavam habituados a determinar a posição dos astros com boa precisão, pois dispunham de bons telescópios ópticos (que operavam na luz visível). Desde 1908 o Observatório Monte Wilson ao norte de Los Angeles abrigou o Telescópio de 1,5 m e, a partir de 1917, o de 2,5 m e o Observatório Palomar, bem ao sul de Los Angeles, abrigou o Telescópio de 5,1 m a partir de 1949, ou seja, esse complexo constituía a meca da observação astronômica na luz visível. Mas a posição das rádio-fontes no céu eram determinadas com margem de incerteza muito grande. No jargão astronômico, a caixa de erro das rádio-fontes era muito grande: a rádio-fonte poderia estar em qualquer ponto dentro de um grande quadrado desenhado no mapa do céu. Isso demandava dos radiotelescópios uma melhor capacidade de definir a posição das fontes no céu ou uma caixa de erro menor. Era preciso melhorar a resolução angular dos radiotelescópios.

A resolução angular melhora quando ela diminui, pois com resolução angular menor localizamos os astros com maior precisão no céu, detectamos melhor os detalhes.

O tempo passou e até a II Guerra já tinha terminado. Muitos físicos experimentais que tinham trabalhado com radares no esforço de guerra, tinham ganho experiência que, agora, não poderia ter melhor campo de aplicação do que o desenvolvimento da radioastronomia. Grupos dedicados a esse novo campo de pesquisa surgiram na Inglaterra e Austrália, não nos Estados Unidos. A prioridade era óbvia: melhorar a resolução angular dos radiotelescópios. Mas já em 1949 esse problema estava resolvido. Foi pela invenção de rádio-interferômetros.

A resolução angular de um radiotelescópio é proporcional ao comprimento de onda da radiação observada, dividido pelo diâmetro do coletor da radiação (o paraboloide no caso de um radiotelescópio; o espelho (ou lente) da objetiva no caso de um telescópio óptico). Por que é assim? Uma explicação mais detalhada será dada mais adiante, pois ela é fundamental para entendermos como a imagem do buraco negro foi obtida. Mas já podemos entender que, com um radiotelescópio do mesmo tamanho de um telescópio óptico obtemos uma resolução angular maior (portanto, pior) que a do telescópio óptico porque o comprimento das ondas de rádio é vários milhões de vezes maior que o de ondas da luz visível. Todavia, do ponto de vista prático, geralmente é mais factível e barato aumentar o tamanho de uma antena do que de um espelho.

Podemos, então, melhorar (quer dizer, diminuir) a resolução angular de um radiotelescópio aumentando o diâmetro do paraboloide. Mas, em vez de aumentar o diâmetro, o que pode se tornar proibitivo acima de um “tamanho crítico”, podemos recorrer ao princípio da interferometria. Esse é o “pulo do gato”: em vez de uma antena, por exemplo, com 1 km de diâmetro, podemos usar duas antenas bem menores, digamos com 1 m de diâmetro, distantes 1 km entre si, obviamente conectadas eletronicamente. O conjunto de duas antenas menores operando coordenadamente é chamado interferômetro. Esse interferômetro tem a mesma resolução angular que a antena com 1 km de diâmetro. Não tem a mesma sensibilidade para captar sinais, pois a área coletora da radiação é significativamente menor, e

isso tem um preço a ser pago. No entanto isso pode deixar de ser importante quando o sinal estudado é suficientemente intenso.

Em 1949 o grupo australiano conseguiu reduzir a largura da caixa de erro para 10' (10 minutos de arco sendo $1' = 1^\circ/60$). Então os astrônomos observadores na luz visível sentiram-se encorajados a esquadrihar a caixa de erro de α Cyg A mas, mesmo assim, não encontraram nada brilhante digno de nota. Na caixa de erro, de fato, apareceu uma enormidade de pontos, uns mais outros menos luminosos. Teria aparecido também uma galáxia sabidamente distante - e esse era o objeto associado - mas, na época, era difícil que algum astrônomo achasse razoável que os fortes sinais de rádio viessem de tão longe. Portanto era mais seguro apostar que esses sinais viessem de um daqueles inumeráveis pontos de fraco brilho que estivessem bem próximos, na nossa própria Galáxia (aposta equivocada).

Em 1951 um grupo inglês de Cambridge conseguiu reduzir ainda mais a caixa de erro de *Cyg A*, desta vez para 1'. Na luz visível essa caixa de erro continha cerca de uma centena de pontos brilhantes e ela foi fotografada com o novo Telescópio de 5 m do Palomar. Desta vez a fotografia mostrou na caixa de erro uma galáxia que enganosamente parecia duas galáxias colidindo. Posteriormente se constatou que uma faixa escura (de fato, um disco com poeira visto de perfil), fez a galáxia única parecer dividida em duas e em colisão.

Em 1953, o outro grupo inglês do Observatório Jodrell Bank, da Universidade de Manchester, observou *Cyg A* com seu novo rádio-interferômetro e constatou que a rádio-emissão provinha de dois gigantescos lobos. Sobrepondo esses lobos a uma fotografia da galáxia na luz visível, cada um dos lobos se localizou dos lados opostos da galáxia e o conjunto todo foi classificado como uma rádio-galáxia, pois tratava-se de uma galáxia elíptica gigante a 500 milhões a.l., mas ela emitia intensa radiação em ondas de rádio. Essas ondas provinham de imensas regiões do par de lobos afastados mais de 250 mil a.l. do núcleo da galáxia. Relativamente aos lobos, a galáxia era proporcionalmente diminuta. No entanto seria nela que se inferiria posteriormente a existência de um buraco negro supermassivo.

Até meados do século 20 ainda era difícil explicar o mecanismo gerador das intensas ondas cósmicas de rádio. O que então era concebível,

era o mecanismo térmico em que a fonte deveria ter matéria aquecida a alta temperatura. Mas foi então quando o mecanismo síncrotron começou a ser considerado capaz de produzir tais ondas de rádio. Quando um feixe de elétrons com velocidade próxima à da luz é lançado num campo magnético, por serem cargas elétricas (negativas) os elétrons passam a espiralar em torno das linhas de força do campo magnético. Sendo o espiralamento uma aceleração centrípeta sofrida pelos elétrons, estes passam a emitir radiação eletromagnética em ondas de rádio. Os elétrons emitem essa radiação perdendo energia cinética. O mecanismo síncrotron não é de natureza térmica porque a energia dos elétrons não se origina do aquecimento, nem eles colidem frequentemente entre si.

Um cálculo simples revelou que a energia (cinética dos elétrons e magnética do campo) contida nos lobos era colossal e, considerando a equivalência de Einstein entre massa e energia, $E = Mc^2$, ela equivalia a 10 milhões de sóis. A origem não podia ser química, pois requeria a massa de 100 mil Vias Lácteas; poderia ser nuclear requerendo 1 milhão M_{\odot} , mas isso era improvável; poderia ser 5 milhões M_{\odot} de antimatéria sendo aniquiladas por igual quantidade de matéria ordinária, mas de onde viria tanta antimatéria? Todavia a energia de origem gravitacional, a mesma que forma os buracos negros estelares, originária do colapso gravitacional de cerca de 100 milhões M_{\odot} foi considerada plausível já em 1963. Foi quando a ideia de buracos negros supermassivos em rádio-galáxias, assim como em quasares, como veremos adiante, começou a ser teorizada.

Com novos rádio-interferômetros cada vez maiores, mais sensíveis e com melhor resolução angular, por volta de 1971 já se sabia que a rádio-emissão provinha não só do par de lobos, mas também de um pequeno núcleo da galáxia central, o que sugeriu que esse núcleo poderia ser a fonte de energia de toda emissão da rádio-galáxia, inclusive ejetando jatos de gás a enormes velocidades que formavam os lobos. Essa hipótese foi confirmada pelos novos interferômetros com resolução angular de $1''$. A Figura 7 mostra a rádio-galáxia *Cyg A* observada mais recentemente com o rádio-interferômetro VLA instalado no condado de Socorro, no Novo México, que conta com 27 antenas parabólicas dispostas na configuração da letra Y.

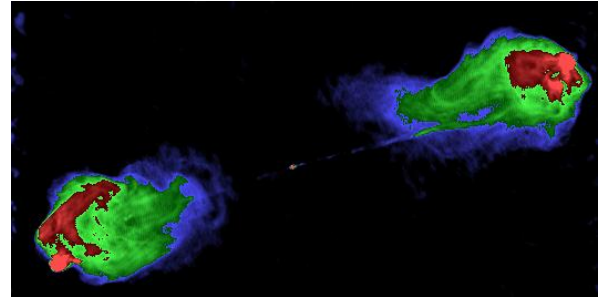


Figura 7: Imagem da rádio-galáxia *Cyg A* obtida em 4,9 GHz com resolução de $0,4''$ com o interferômetro VLA. Os dois rádio-lóbulos estão ligados por finos jatos relativísticos ejetados pelo buraco negro supermassivo no centro da imagem. Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Cygnus_A.

Os jatos seguem retilíneos por milhões a.l. e, se a pequena fonte que os emite gira, a direção da ejeção (a mesma do eixo de rotação da fonte) deve se manter estável por milhões de anos, já que os jatos não podem avançar com velocidade maior que a da luz. Essa estabilidade direcional da fonte é porque ela atua como um giroscópio. Uma fonte que fosse compacta, de um mês-luz¹⁸ no máximo (ver adiante), com capacidade de emitir jatos tão poderosos e que atuasse como um giroscópio com extrema estabilidade direcional só poderia ser um buraco negro supermassivo. O estudo de buracos negros dotados de rotação rápida (Schwarzschild estudou buracos negros sem rotação) mostrou que o espaço¹⁹ no plano de rotação (plano equatorial) e imediatamente fora do horizonte de eventos, é arrastado pela rotação do buraco negro e passa a girar como um rodadoiro (imaginem um tornado do espaço!). Mesmo que a matéria distante capturada pelo buraco negro se aproxime dele num disco de acreção que pode estar orientado num plano qualquer, perto do horizonte de eventos o disco de acreção ajusta sua orientação segundo o plano equatorial do buraco negro. Dessa forma o buraco negro mantém firmemente a orientação de sua rotação como um giroscópio.

Os jatos são ejetados perpendicularmente ao equador do buraco negro porque no pequeno volume (astronomicamente falando) onde o disco de acreção quase toca o horizonte de eventos, o gás está incrivelmente aquecido, portanto fortemente

¹⁸Distância percorrida pela luz em um mês, cerca de 1 a.l./12.

¹⁹Que o espaço se deixe deformar sob a ação da gravidade é algo com que começamos a nos acostumar ouvindo falar da deflexão da luz de uma estrela distante, ao passar perto do Sol, sendo observada no eclipse total do Sol ocorrido em 29 de maio de 1919 em Sobral, CE.

pressionado para se expandir. Mas se o gás está altamente aquecido, também está ionizado. Sofrendo violentas colisões nessas altas temperaturas, átomos perdem elétrons que se tornam livres e, os átomos, com excesso de prótons (ou de carga positiva), já não são mais átomos, mas íons. O gás resultante é formado de íons e elétrons. Tecnicamente é chamado plasma. O plasma não é mais eletricamente neutro (como, grosso modo, é o ar que respiramos), mas eletricamente condutor (capaz de conduzir correntes elétricas). Um gás ionizado tem a capacidade de se acoplar ao campo magnético. As linhas de força do campo magnético ancoradas no disco de acreção, justamente porque estão acopladas à matéria ionizada, são forçadas a girar com o disco, de sorte que elas literalmente se enrolam dando origem a espirais magnéticas em lados opostos do disco de acreção. O eixo das espirais coincide com o eixo de rotação do buraco negro. Por intermédio do campo magnético os jatos ganham energia rotacional do buraco negro. O gás ejetado pelos tubos magnéticos, que há pouco escapou de cair no buraco negro, flui a altas velocidades formando os jatos.

Lembremos que a rádio-emissão observada é produto do mecanismo síncrotron em que elétrons a alta velocidade interagem com o campo magnético. A fonte de energia dos jatos e da sua rádio-emissão é a energia de rotação do buraco negro. Isso pode soar fisicamente impossível, pois energia estaria sendo retirada do buraco negro. No entanto, neste caso isso é possível porque supostamente a matéria do disco de acreção, ao cruzar o horizonte de eventos transporta consigo o campo magnético, assegurando a continuidade das linhas de força através do horizonte de eventos. Desta forma, o campo magnético intervém fisicamente na extração da energia de rotação do buraco negro para a formação dos jatos.

4.7 Quasares

Agora uma rádio-fonte, *Cyg A*, mostrava uma intrigante relação com uma galáxia óptica e esse fato tirou os astrônomos ópticos da indiferença inicial. Mas, embora a radioastronomia tenha nascido nos Estados Unidos, os americanos estavam sendo meros expectadores das notáveis descobertas que estavam sendo feitas em rádio-observatórios ingleses e australianos. Isso sacudiu os brios americanos e a National Science Foundation, em Washington, DC, lançou o projeto re-

lâmpago de criação do National Radio Astronomy Observatory em Greenbank, WV, e o Instituto Tecnológico da Califórnia (Caltech) em Pasadena (perto de Los Angeles), sede administrativa dos Observatórios Monte Wilson e Palomar, se lançou na construção do rádio-interferômetro da Caltech em Owens Valley, no sudeste do Parque Nacional de Yosemite.

Uma nova surpresa veio em 1960 de Jodrell Bank. Uma rádio-fonte denominada 3C48 (48^a fonte da 3^a versão de um catálogo de Cambridge) tinha sido descoberta. Ela era tão pequena, que seu diâmetro angular não chegava a 1". O interferômetro de Jodrell Bank não foi capaz de dar a posição dessa compacta fonte com caixa de erro decente. Foi a oportunidade para que a equipe de Owens Valley, com seu novo rádio-interferômetro, determinasse a posição com uma caixa de erro de 5", que foi repassada para os colegas ópticos do Observatório Palomar. Na fotografia astronômica centrada na caixa de erro, apareceu para surpresa geral, não a imagem de uma galáxia, mas apenas um ponto azul com aparência de estrela. Por isso mesmo, objetos deste tipo que continuariam seriam descobertos, foram coletivamente denominados quasares (forma abreviada de quasi-stellar objects). Nos dois anos seguintes, cerca de meia dúzia de novos quasares foram descobertos e continuaram intrigando. Na tentativa de conhecer sua natureza os astrônomos ópticos, além de fotografarem, também obtinham o *espectro*.²⁰

O espectro do quasar 3C273 era muito estranho, bastante diferente do espectro que era observado nas estrelas. Demorou muito para que astrônomos experientes se dessem conta de que um conjunto de linhas espectrais desse quasar, eram as costumeiras linhas devidas ao hidrogênio vistas inúmeras vezes e habitualmente reconhecidas, mas que estavam anormalmente deslocadas para o vermelho, isto é, para comprimentos de onda mais longos. Descobriu-se então que 3C273 tinha hidrogênio e estava se afastando a cerca de 16% da velocidade da luz, uma velocidade muito maior do que qualquer astrônomo tinha visto até

²⁰O espectro é a distribuição contínua de cores, como num arco-íris, da luz de um astro. O espectro pode ser obtido dispersando-se a luz original, por exemplo, fazendo-a passar através de um prisma, de modo a decompô-la em seus vários comprimentos de onda. Analisando o espectro da luz os astrônomos determinam a composição química, as condições físicas dos astros e a velocidade de seus movimentos na direção da linha de visada do astro.

então em estrelas.

Já o espectro de 3C48 não mostrava as linhas do hidrogênio, mas do magnésio, oxigênio e neônio, que indicavam um afastamento mais veloz, de 37% da velocidade da luz. Com velocidades tão grandes de afastamento, os quasares definitivamente não poderiam ser estrelas da nossa Galáxia. Deveriam ser astros muito distantes, participando da expansão do universo. Na expansão do universo a velocidade de afastamento é tanto maior, quanto mais distante ele se encontra. De acordo com essa lei 3C273 estaria a 2 bilhões a.l. e 3C48 a 4,5 bilhões a.l. Distância tão grande teria uma consequência importante: para serem vistos com o brilho que tinham no telescópio de 5 m, teriam que irradiar 100 vezes mais que as mais luminosas galáxias!

3C273 era, na verdade, tão brilhante que mesmo telescópios de tamanho modesto já o tinham fotografado milhares de vezes desde 1895. Foi feita uma busca dessas fotografias e, com base nelas, se concluiu que o brilho variava. As flutuações eram tipicamente mensais. Dessa simples informação os astrônomos tiraram uma importante conclusão: a fonte emissora da radiação deveria ter estimativamente um tamanho correspondente à distância percorrida pela luz em um mês. Pois, se fosse maior, não haveria um agente físico viajando com velocidade igual ou menor que a da luz, capaz de fazer a fonte aumentar ou diminuir a radiação, em uníssono, no intervalo de um mês. Assim aprendíamos que a rádio-fonte efetiva do quasar 3C273 era compacta. Para formarmos uma ideia, ela teria mais ou menos o tamanho da parte interna da *Nuvem de Oort*, estrutura com forma de concha que deve abrigar centenas de bilhões de cometas do Sistema Solar. Essa “pequenez” (em escala cósmica) da rádio-fonte já sugeria sua conexão com um buraco negro supermassivo, mas os astrônomos demorariam ainda uma década até chegarem definitivamente a essa conclusão.

4.8 Montando o quebra-cabeça

Seguindo a cronologia histórica, descrevi as primeiras manifestações dos objetos que viriam a ser chamados buracos negros supermassivos: *Sagittarius A** no núcleo da Via Láctea, a rádio-galáxia *Cyg A* e os quasares 3C48 e 3C273. O denominador comum desses objetos é que cada um deles é, na verdade, uma galáxia com um buraco negro

supermassivo alojado no seu interior.

À medida que as observações e os estudos foram avançando, um novo conceito astronômico foi se firmando, o de núcleo ativo de galáxia. Tal núcleo designa o pequeno objeto (pequeno, para os padrões astronômicos) que, além de abrigar o buraco negro supermassivo, emite de seus arredores uma quantidade prodigiosa de energia na forma de ondas de rádio, luz visível, raios X e gama, além de jatos de partículas com velocidades relativísticas.²¹ Essa energia é de natureza bem diferente daquela emitida pelas estrelas de uma galáxia. Galáxias que têm núcleos ativos são classificadas como galáxias ativas. Fisicamente, o que torna o núcleo ativo é a acreção de matéria no buraco negro através de um disco de acreção. Com isso a massa do buraco negro está aumentando. A presença de jato é reveladora de que o núcleo da galáxia é ativo, pois o jato é um subproduto da acreção.

Da pequena lista histórica, a rádio-galáxia *Cyg A* (assim como todas as rádio-galáxias) e os quasares 3C48 e 3C273 (assim como todos os quasares) são galáxias ativas. Ficou de fora *Sagittarius A** porque a nossa Galáxia não emite aquela quantidade prodigiosa de energia na forma de radiação e de partículas. Além disso, o grosso de sua energia é de origem estelar. Mas sobre *Sagittarius A** voltarei a falar mais adiante. Antes quero responder à pergunta: se rádio-galáxias e quasares são energizados quase da mesma forma por buracos negros, o que os faz parecerem tão diferentes? Na luz visível, rádio-galáxias parecem conjuntos de estrelas como a Via Láctea, com cerca de 100 mil a.l., enquanto quasares são extremamente luminosos, têm aparência estelar e cerca de 1 mês-luz. Apesar dessas diferenças, o buraco negro central dos quasares também é circundado por uma galáxia de 100 mil a.l. só que, sendo alimentado de matéria pelo disco de acreção numa taxa muito maior, o disco teria um brilho muito maior. Isso ofuscaria as estrelas da galáxia e daria aparência estelar aos quasares. Nas rádio-galáxias a taxa de alimentação de matéria pelo disco de acreção seria menor. O disco seria menos brilhante, o que permitiria observar as estrelas da galáxia, contudo a atuação conjunta do disco de acreção, do buraco negro com rotação

²¹Esses jatos com milhares a.l. de comprimento são os maiores aceleradores naturais de partículas. O túnel circular do famoso Grande Colisor de Hádrons, na fronteira franco-suíça perto de Genebra, tem 27 km.

e das linhas de força do campo magnético enredadas no buraco negro continuaria produzindo os jatos e os lobos de rádio-emissão.

Voltando a *Sagittarius A**, já em 1970 havia sido notado que o movimento orbital de estrelas próximas ao núcleo de galáxias espirais só podia ser explicado pela concentração de uma imensa massa no núcleo, massa essa maior que pudesse ser explicada por estrelas ordinárias. A solução para esse dilema era um buraco negro supermassivo. A hipótese de que o centro da Via Láctea abrigaria um buraco negro supermassivo é de 1971 e já em 1974 a existência desse buraco negro foi evidenciada pela detecção da compacta rádio-fonte de radiação síncrotron que recebeu o nome *Sagittarius A**.

Evidências acumuladas na década de 1980 sugeriram que buracos negros supermassivos encontram-se não só no núcleo de quasares e rádio-galáxias, mas também de galáxias normais (isto é, não ativas) elípticas ou espirais e mesmo galáxias menores. Nesse caso os buracos negros seriam desprovidos de discos de acreção, teriam apenas um disco tênue e seriam quiescentes. A evidência de um buraco negro com 4,3 milhões M_{\odot} no centro da nossa Galáxia veio da análise do movimento de nuvens de gás, observáveis em infravermelho que o orbitam, e da rádio-emissão de uma fonte não maior que o Sistema Solar associada ao buraco negro. Em se tratando de galáxias normais, podemos pensar que toda sua luminosidade corresponde à soma da emissão de todas as suas estrelas. Portanto a nossa Galáxia é considerada sem núcleo ativo, mas com núcleo quiescente, o que não exclui a possibilidade de que ele já tenha sido ativo, ou venha a ser temporariamente.

4.9 Origem dos buracos negros supermassivos

Vimos como se formam os buracos negros estelares. É pelo colapso gravitacional de estrelas. Mas a origem dos buracos negros supermassivos ainda é obscura. Porém, uma coisa parece certa: eles não nascem já com toda a massa. Devendo crescer, cada buraco negro supermassivo poderia iniciar com uma estrela progenitora muito massiva (estimativamente com mais de centenas de M_{\odot}) que, após sua evolução daria lugar a um buraco negro estelar supermassivo que, por sua vez, ao longo do tempo, através da fusão com ou-

tros buracos negros estelares, se tornaria suficientemente massivo para dar origem a um buraco negro supermassivo.

Uma teoria bastante popular alega que no início do universo, cerca de 100 milhões de anos após o Big Bang, estrelas supermassivas puderam se formar a partir de nuvens interestelares de galáxias primordiais. Isso era possível, mas não mais atualmente, porque a matéria interestelar ainda era formada quase que exclusivamente de hidrogênio e hélio. O teor de elementos pesados (ou metais, segundo o jargão dos astrofísicos) como o carbono e o oxigênio foi aumentando com o tempo, na medida em que esses elementos foram produzidos no interior das estrelas por reações de fusão nuclear. Sabemos que os elementos pesados irradiam eficientemente e promovem rápido esfriamento da matéria interestelar. Nessas condições, o objeto que colapsa sofre fragmentação, o que impede a reunião de toda a massa num único corpo. Supostamente tal fragmentação não ocorreria no universo primordial, o que possibilitaria a formação de buracos negros supermassivos.

Mas essa explicação esbarra num problema: o universo observável tem estimativamente 100 bilhões de galáxias e supostamente todos eles têm um buraco negro supermassivo no seu interior. Segundo estudos, o colapso gravitacional direto da matéria interestelar primordial não seria capaz de produzir estrelas progenitoras supermassivas em quantidade suficiente para explicar o grande número de buracos negros supermassivos observados hoje. Para contornar esse problema, considera-se que mesmo as nuvens interestelares já contaminadas com metais pesados tenham sido capazes de formar estrelas progenitoras supermassivas incluindo, porém, além do colapso gravitacional do gás interestelar, o canibalismo de buracos negros menores que seriam arrastados pelos gases fluindo na direção das estrelas supermassivas. Mas, por enquanto, isso é apenas uma hipótese.

5 Análise da primeira imagem

A primeira imagem é apresentada abaixo (Figura 8). Não é por má qualidade da reprodução, mas a imagem original já é meio desfocada porque a resolução angular era insuficiente.

As cores da imagem são falsas, pois a observação não foi feita na luz visível, mas em ondas

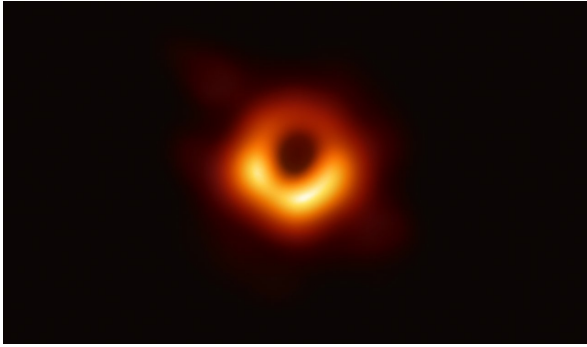


Figura 8: No centro escuro, um buraco negro supermassivo: uma besta-fera voraz no centro da galáxia M87. O N é para cima e o L para a esquerda. Crédito: EHT Collaboration. Fonte: www.eso.org/public/images/eso1907a/.

de rádio de 1,3 mm (230 GHz). As cores codificam temperaturas entre 1 e 10 bilhões K, as mais claras sendo as mais elevadas.

5.1 O anel luminoso

Logo que foi dada publicidade à imagem, nela foi destacado um *anel luminoso* que circundava um *disco escuro*. O anel brilhante e o disco escuro eram as principais estruturas observacionais da imagem. Segundo os analistas do projeto *EHT*, o diâmetro externo da porção mais brilhante do anel luminoso tinha $0,000043''$. A maior parte do brilho desse anel provém da matéria do disco de acreção, superaquecida a dezenas de milhões K e turbilhonando ao redor do buraco negro a velocidades relativísticas. Matéria que estava em vias de cair no buraco negro e desaparecer para sempre, teria enviado as ondas de rádio que recebemos em abril de 2017.

Na imagem, a parte inferior do anel tinha um brilho mais intenso, que foi explicado como sendo devido à colimação da radiação quando as partículas que irradiam (elétrons) se deslocam a velocidades próximas à da luz. Nessa situação, a radiação em vez de ser emitida igualmente em todas as direções, ela passa a ser emitida por um cone estreito, aberto na direção para a qual a partícula se move.

Na Figura 2, vemos na parte superior à esquerda um objeto extenso e brilhante que é a rádio-galáxia em cujo centro se encontra o buraco negro da Figura 8. Vê-se também um dos jatos lançado na direção entre 4 e 5 horas do ponteiro do relógio. Daí se inferiu a orientação do eixo de rotação do buraco negro, supostamente a mesma do jato. Como o disco de acreção é perpendicular

ao eixo de rotação, esse disco teria sido visto por nós, na imagem, quase frontalmente. Esse “quase” é um desvio de 17° entre o plano do disco de acreção no espaço e o plano em que a imagem está projetada (plano do papel). *Grosso modo*, na parte superior da imagem o disco de acreção estaria abaixo do plano do papel e, na parte inferior, acima. Concluiu-se também que o turbilhonamento da matéria no disco é no sentido horário (dos ponteiros do relógio), completando uma volta a cada 2 dias.

Já antecipo que a esse anel brilhante associado ao disco de acreção, se sobrepõe um anel de brilho menos intenso, formado por fótons que se aproximaram do buraco negro vindo de todas as direções do universo distante, todavia escaparam de cair nele, mas sofreram deflexões gravitacionais. Alguns desses fótons orbitaram temporariamente ao redor dele, nas proximidades da esfera de fótons (ver logo adiante) e, finalmente, conseguiram escapar para o infinito, alguns vindo na nossa direção, em que a imagem foi obtida.

Bem na parte central do disco escuro da imagem encontra-se o horizonte de eventos (objeto intrinsecamente escuro), uma esfera com $1 R_S$. Qualquer fóton que incida nessa superfície é capturado e desaparece para sempre. Por outro lado, o raio interno do disco de acreção deve ser da ordem de $3 R_S$, uma vez que essa é a menor órbita estável para a matéria. Portanto, há entre eles um bom espaço para o tráfego de fótons sobreviventes que chamarei fótons perambulantes, entendendo que suas trajetórias, nessa região de forte campo gravitacional, sofrem fortes desvios.

Sabemos que a menor órbita em que um fóton pode descrever um círculo em torno de um buraco negro tem raio igual a $1,5 R_S$. Esse círculo é chamado *anel de fótons* e tem uma propriedade pitoresca: se pudéssemos estar nele olhando para a frente, veríamos a nossa própria nuca! Como os fótons podem orbitar esse círculo em qualquer direção, o que existe na verdade não é apenas um anel, mas uma superfície esférica envolvendo o buraco negro, na qual os fótons poderão permanecer aprisionados por um certo tempo, formando a chamada esfera de fótons. Mas muitos fótons perambulantes poderão também orbitar um número menor de vezes em torno do buraco negro em órbita um pouco menor, ou maior que a esfera de fótons, de modo que uma concha esférica envolvendo a esfera de fótons pode ser imaginada como



Figura 9: Fótons vêm de longe, à direita, e suas trajetórias sofrem deflexão conforme se aproximam do buraco negro. O círculo interno, completamente negro, representa o horizonte de eventos (raio = $1 R_S$); o círculo externo representa a esfera de fótons (raio = $1,5 R_S$). A seta vertical à direita mede o parâmetro de impacto dos fótons. Parâmetro de impacto é a distância perpendicular entre a trajetória do fóton e o centro do buraco negro. Fótons que se aproximam do buraco negro com parâmetro de impacto menor ou igual a $2,6 R_S$, incidem na superfície do horizonte de eventos e desaparecem. Mas quando o parâmetro de impacto é pouco maior que $2,6 R_S$, o fóton orbita o buraco negro nas proximidades da esfera de fótons e pode escapar para o infinito à esquerda. Agora tiro vantagem do fato de que o fóton que escapa para o infinito à esquerda pode ser imaginado viajando no sentido oposto e que nós, como observadores da imagem, estamos longe, à direita. O anel brilhante formado por esses fótons terá na imagem um raio interno igual a $2,6 R_S$. Imagem retirada pelo autor do vídeo www.youtube.com/watch?v=zUyH3XhpLTo.

uma armadilha temporária de fótons. Ao mesmo tempo essa armadilha é também uma plataforma de lançamento de fótons, já que eles podem escapar para todas as direções do universo. Os fótons que vierem na nossa direção poderão contribuir na formação do anel brilhante da imagem. Não é muito difícil mostrar que o raio interno desse anel na imagem mede $2,6 R_S$ (Figura 9). Essa Figura mostra que a parte interna do anel é escura porque seus fótons teriam que vir do horizonte de eventos, o que é impossível. Só fótons rasantes ao horizonte de eventos podem ser vistos formando a imagem. O aumento do raio do horizonte de eventos de $1,5 R_S$ para $2,6 R_S$ na imagem pode ser interpretado como um efeito de lente gravitacional.

Segundo simulações, os fótons perambulantes devem formar na imagem um anel de brilho difuso com raio interno de $2,6 R_S$ e externo de $3,0 R_S$, que praticamente se encaixa no interior do brilhante disco de acreção.

Pelo que foi dito, o disco escuro não é bem uma sombra, nem silhueta como ouvimos muitas vezes, mas um *vulto*²² do horizonte de eventos, visível graças à aura luminosa formada pelos fótons perambulantes que acabaram vindo na nossa direção. O termo “sombra” pode ser enganador porque, de fato, não há uma fonte distante, ao fundo, que esteja sendo eclipsada por um objeto opaco no caminho. Além disso, esse termo nos induz a pensar na propagação retilínea da luz, sendo que nas proximidades de um buraco negro a deflexão da trajetória da luz é o fenômeno dominante.

Na imagem, é difícil definir o diâmetro do disco central escuro pela presença de muitos tons de cinza. Seu bordo seria o limite observacional de aproximação máxima ao horizonte de evento. Mas, associando esse tamanho angular a alguns R_S , a massa do buraco negro apresenta um valor concordante com a teoria vigente.

6 Técnica VLBI (Very-long-baseline interferometry)

Esta é a parte final do texto. Nela pretendo apresentar algumas noções básicas sobre a técnica utilizada para a obtenção da imagem do buraco negro. Mas isso precisa ser precedido por uma breve discussão sobre a natureza da luz.

6.1 Natureza da luz: onda ou partícula?

A luz, assim como qualquer radiação eletromagnética (raios gama, raios X, raios ultravioletas, luz visível, radiação infravermelha e ondas de rádio) apresenta um comportamento estranho: dependendo do experimento, ela se comporta como partícula (fóton) ou como onda. Mas, investigando mais profundamente, se concluiu que qualquer radiação eletromagnética deve ser entendida como uma entidade de natureza dupla denominada onda-partícula. Portanto, não é mais que a radiação se comporta ora como onda, ora como partícula. A dualidade onda-partícula significa que a radiação é, ao mesmo tempo, onda e partícula, algo incompreensível e até mesmo contraditório na física clássica, cujos conceitos ainda dialogam com a nossa linguagem coloquial. Mas a dualidade onda-partícula é um conceito da mecânica quântica que se aplica a fótons, assim como a

²²Prefiro o termo “vulto” por achar que ele sugere algo indistinto, indefinido.

partículas elementares (componentes fundamentais da matéria), átomos e moléculas. A dualidade foi criada justamente para remediar a incapacidade do conceito clássico só de onda, ou só de partícula, de descrever satisfatoriamente os fenômenos do mundo microscópico.

Não irei tão longe a ponto de explicar quantitativamente a formação da imagem do buraco negro, pois seria complicar as coisas desnecessariamente. Mas, ao explicar a obtenção da imagem, consideraremos o tempo todo os sinais de rádio captados pelo *EHT* como onda.

Se a radiação proveniente de um astro distante passar por uma abertura (fenda) com dimensão sensivelmente maior que o comprimento de onda da radiação, numa tela adiante veremos uma imagem luminosa replicando nitidamente a silhueta da abertura. Mas, se a largura da fenda é diminuída, já não é mais isso que se observa. Para termos uma noção das dimensões com que estamos lidando, tenhamos em mente que o diâmetro de um fio de nosso cabelo é centenas de vezes maior que o comprimento de onda médio da luz visível. Um experimento simples para observarmos o comportamento da luz numa fenda estreita é olhar para uma fonte luminosa através do vão que se forma quando aproximamos os dedos estendidos de uma das mãos. O vão pode ser milimétrico, mas nele já poderemos perceber franjas escuras ao longo do vão. Elas resultam da interferência destrutiva (explico adiante) da luz, que já não passa pela abertura em linha reta. Os bordos da abertura espalham a luz para outras direções, por isso ela interfere destrutivamente. A imagem luminosa que se forma do outro lado da abertura já não é uma silhueta nítida da abertura, mas algo espalhado angularmente e difuso. São efeitos ópticos do fenômeno da difração (Figura 10). A difração é explicada pela natureza ondulatória da luz. O fato de a difração não ser vista quando o tamanho da abertura cresce é mais uma questão de percepção. A difração continua ocorrendo, porém ela se torna cada vez menos perceptível.

6.2 Resolução angular

Já me referi várias vezes à resolução angular. Mas aqui vou associá-la à natureza ondulatória da radiação eletromagnética, o que a tornará perfeitamente compreensível. Essa compreensão é importante porque a espinha dorsal do projeto *EHT* consiste, no fundo, em levar o conceito de

resolução angular até as últimas consequências.

No julgamento do desempenho de um telescópio, muitas vezes as pessoas se equivocam pensando que o mais importante é o aumento, a capacidade de aumentar o tamanho da imagem. Na prática, uma vez obtida a imagem com uma objetiva de um determinado diâmetro, o aumento pode ser feito indefinidamente trocando-se uma lente secundária (ocular). Como a luz coletada com a objetiva é a mesma, o resultado é uma imagem cada vez maior, porém, com brilho cada vez mais diluído. A mesma quantidade de luz está sendo distribuída sobre uma imagem mais extensa.

Suponhamos um telescópio que nos mostre uma imagem em que duas estrelas se encontram angularmente tão próximas, que aparentam estarem fundidas num único objeto. Nessa situação, se o interesse é obter uma imagem melhor, o telescópio deve ser capaz de separar (ou discriminar) as estrelas. O aumento oferecerá apenas a ampliação de uma imagem, na qual as duas estrelas jamais aparecerão nitidamente separadas, senão sempre confundidas numa única mancha difusa.

Por isso, na escolha de um telescópio é importante saber se ele é capaz de discriminar dois objetos separados no céu por uma pequena distância angular, distância essa que pode ser estipulada segundo a exigência do interessado. O telescópio terá essa capacidade se sua resolução angular for, pelo menos, igual a essa distância angular. Detalhes ainda menores não serão discriminados, mas o telescópio já atenderá o desejo do interessado.

Para exemplificar, comecemos com o nosso olho. Ele funciona como um instrumento óptico. Ele tem uma lente interna cuja abertura é controlada pela pupila. No escuro da noite, quando fazemos observações astronômicas, o diâmetro da nossa pupila atinge cerca de 7 mm e a resolução angular média do olho (olho nu, sem óculos ou outro instrumento) é de cerca de 1'. Para discriminar detalhes menores, teremos que recorrer a uma lupa ou luneta que nos proporcione uma resolução angular menor que 1'. Se continuarmos observando no mesmo comprimento de onda, deveremos aumentar o diâmetro da abertura que capta a radiação, já que a resolução angular decresce (melhora) segundo o inverso do diâmetro da abertura.

Se nosso olho e se os telescópios funcionassem idealmente, de uma fonte distante de luz com as-

pecto pontual (como uma estrela noturna), eles deveriam produzir uma imagem fielmente pontual. Mas, não é isso que acontece na prática. Se isso acontecesse, a resolução angular do olho e dos telescópios seria igual a zero!

Se fotografarmos uma estrela com um telescópio, a imagem não será pontual, mas um disco difuso com um certo diâmetro. Esse diâmetro é pequeno, porém, não nulo. O disco não é a imagem da estrela, embora saibamos que esta seja sensivelmente esférica. Claro, parte da difusão da imagem pode ser devida a outros fatores como focalização imperfeita, falhas na curvatura da lente, impurezas no vidro da lente, sujeira na superfície da lente, cintilação²³ da estrela etc. Mas, mesmo que todos esses problemas sejam eliminados, um disco residual difuso continuará sendo visto porque é decorrente da natureza da luz, e isso é algo que não pode deixar de existir. O diâmetro desse disco residual é igual à resolução angular do telescópio utilizado. Se a estrela fotografada estivesse ao lado de uma outra, a uma distância angular menor que a resolução angular, ambas apareceriam confundidas num único disco difuso.

6.3 Difração

Consideremos um experimento de óptica (Figura 10) com uma fonte luminosa pontual simulando uma estrela distante à esquerda. Na Figura, três setas pretas indicam raios de luz paralelos que chegam na abertura de largura d . Em vermelho, até chegarem na abertura, as ondas se propagam na direção indicada pelos raios. O comprimento de onda, medido entre dois máximos consecutivos da amplitude da onda, está representado pela letra grega λ . As ondas estão em fase, isto é, todas elas oscilam em uníssono. Os traços verticais em vermelho representam uma frente de onda, ou seja, a propagação coletiva das ondas que, como já disse, estão em fase.

A difração começa quando a frente de onda atinge os bordos da abertura mostrados na Figura 10. Segundo a teoria ondulatória, esses bordos assim como quaisquer obstáculos, atuam como novas fontes de ondas. Conseqüentemente a luz se propaga para a região que sombra seria, caso a luz se comportasse como um feixe de partículas.

²³A cintilação de uma estrela consiste em rápidas variações de seu brilho e posição, causadas pela turbulência da nossa atmosfera. Esse efeito é facilmente perceptível quando vemos luzes distantes à noite perto do horizonte.

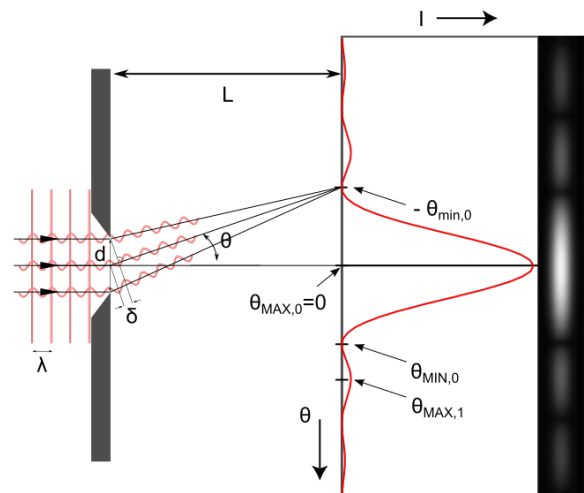


Figura 10: Difração da luz de uma fonte pontual distante à esquerda, ao atravessar uma abertura de largura d . Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Diffraction (Autor: jkrieger - File:Beugungsspalt fuer schlitzenblende2.svg, CC BY-SA 3.0, commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=18705795).

Cada um dos dois bordos passa a emitir ondas que também estarão em fase, pois ambas foram excitadas em fase. Embora não esteja representado na Figura, cada bordo emite sucessivas ondas circulares, pois a velocidade de propagação é supostamente a mesma em todas as direções. A representação gráfica seria de círculos concêntricos ao redor de cada bordo, sendo que o espaçamento entre os sucessivos círculos seria igual ao dos traços vermelhos verticais à esquerda, pois o comprimento da onda continua sendo o mesmo. Isso ficará mais claro num experimento virtual que indicarei adiante.

Bem à direita, a Figura 10 mostra em preto e branco, não a projeção iluminada da abertura, mas uma sequência de franjas claras e escuras se alternando. Um traçado em vermelho indica a intensidade que é máxima na direção original dos raios. Em outras direções a intensidade da luz oscila, atingindo valores mínimos nos pontos indicados com setas pretas.

A formação de sucessivas franjas brilhantes e escuras decorre da *interferência*²⁴ da luz. Isso

²⁴Falava de difração. Agora, no meio da explicação surge um novo fenômeno óptico chamado interferência. É que a difração da luz por uma fenda envolve necessariamente a interferência. Embora a fenda seja única, ela tem dois bordos, cada um funcionando como uma nova fonte de luz. Isso torna possível a interferência da luz proveniente de duas fontes.

pode ser melhor visualizado em ondas na superfície da água. Afinal, o comportamento ondulatório é o mesmo nas ondas da superfície da água, nos fenômenos acústicos (ondas sonoras) e eletromagnéticos (luz visível, ondas de rádio etc.). Ondas na superfície da água se manifestam pela oscilação vertical da água acima e abaixo do nível de repouso. No som, elas causam variação cíclica da pressão atmosférica que é percebida pelos nossos ouvidos. Ondas eletromagnéticas causam variações periódicas do campo elétrico e magnético e as antenas captam as variações do campo elétrico.

Em aulas experimentais de física, ondas são geradas numa cuba de água acionando-se um oscilador que vibra verticalmente numa frequência fixa. O oscilador é colocado na superfície da água, onde atua como uma fonte pontual de ondas. A cada vibração do oscilador, uma onda é gerada. Dada a constância da velocidade de propagação para todas as direções, a onda assume a forma de um círculo crescente. A repetição das oscilações gera sucessivos círculos, todos concêntricos à fonte. Aparecerão círculos onde a água está mais elevada (crista), alternados com círculos em que a água está mais baixa (vale). A distância entre duas cristas sucessivas (ou entre dois vales sucessivos) é o *comprimento de onda*. Em todos os pontos que compõem o círculo concêntrico a onda está em fase, isto é, a etapa do desenvolvimento cíclico da onda é comum. Duas ondas concêntricas geradas em dois pontos distintos também poderão estar em fase, desde que oscilem em uníssono.

A produção de ondas por uma fonte pode ser visualizada no experimento interativo disponível em: www.edumedia-sciences.com/en/media/749-water-wave-interference. Ajuste para zero o valor de *Source separation* e *Phase difference*.

Neste experimento fixamos a frequência de oscilação num valor único. Como a velocidade de propagação da onda na superfície da água é constante, o comprimento de onda também tem um valor único. Por definição, uma onda é denominada monocromática quando sua frequência ou comprimento de onda tem um valor único. Mas essa é uma definição teórica. Na prática não há onda monocromática porque sua energia seria nula. No caso de ondas luminosas como a luz do Sol, temos ao mesmo tempo muitos comprimentos de onda, ou seja, luz de várias cores

que podem ser vistas no arco íris. Nesse caso, para haver interferência é preciso “monocromatizar” a luz, mas isso na prática significa filtrar juntamente com a luz do comprimento de onda que nos interessa, a luz com comprimentos de onda vizinhos. Quanto mais estreita a faixa de comprimentos de onda vizinhos, mais monocromática é a luz, mas a largura dessa faixa deve ser finita, não nula. Por isso é mais apropriado falar em luz quase-monocromática.

Demos agora mais um passo para o entendimento da interferência. Retomemos o experimento didático www.edumedia-sciences.com/en/media/749-water-wave-interference e, desta vez, trabalhemos com duas fontes para vermos como as ondas geradas por elas interagem. Escolha para *Source separation* uma distância que fará o papel da largura da fenda. Mantenha zero para *Phase difference*. Assim as duas fontes emitirão, em fase, ondas da mesma frequência. Elas farão o papel dos dois bordos da abertura da Figura 10, pois eles atuam como novas fontes de ondas oscilando em fase.

Na superfície da água veremos que as ondas de uma fonte se encontrarão com as de outra. Haverá lugares em que a crista de uma onda encontrará a crista da outra. Aí resultará momentaneamente a adição das duas cristas (interferência construtiva). Onde um vale encontrar outro vale, haverá a adição dos dois vales, o que também é interferência construtiva. A interferência entre duas ondas é construtiva quando elas estiverem em fase. Mas, haverá também lugares em que a crista de uma onda encontrará o vale de outra. Nesse caso as duas ondas estarão em oposição de fase e o resultado é o cancelamento momentâneo da oscilação (interferência destrutiva). Tendo em vista a simetria das ondas concêntricas produzidas pelas duas fontes, o lugar das interferências construtivas ou destrutivas também apresentará simetria que pode ser vista no experimento.

O lugar das interferências construtivas ou destrutivas pode ser expresso por uma equação e calculado, pois, são pontos cuja distância a uma das fontes difere da distância à outra fonte, respectivamente, de um múltiplo inteiro do comprimento de onda, ou de um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda. Assim a localização de franjas brilhantes ou escuras na tela pode ser predita em função da direção θ (Figura 10).

Na Figura 10 foi considerada a situação simples

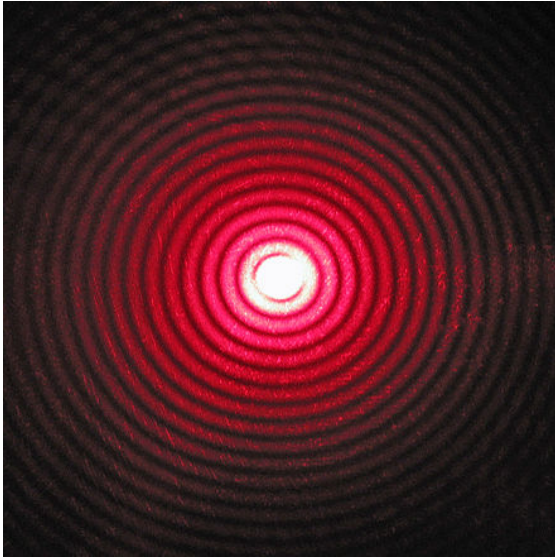


Figura 11: Padrão de difração produzido numa tela por um feixe de laser vermelho que passa por uma pequena abertura circular. Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Diffraction.

de uma fenda de largura d , cujas ondas se propagam numa superfície plana. Mais complexa é a situação de uma abertura circular de diâmetro d , produzindo ondas que se propagam num meio $3D$ (com três dimensões). Na cuba de água as ondas teriam que ser geradas no interior líquido. Mas, mesmo sem fazer isso, podemos prever o resultado, simplesmente considerando que a abertura circular pode ser simulada fazendo-se a fenda linear girar. Então, a rotação daquela sequência linear de franjas da Figura 10 gerará um disco central brilhante circundado por uma sequência de anéis escuros e claros (Figura 11).

O disco central da Figura 11 contém cerca de 84%, portanto, da maior parte da luz que incidiu na abertura. Esse disco é a imagem da fonte pontual formada através dessa abertura. Em termos do ângulo θ da Figura 10, esse disco tem diâmetro angular aproximadamente igual ao comprimento de onda da radiação dividido pelo diâmetro da abertura, que foi como quantifiquei anteriormente a resolução angular da abertura.

Ora, se o objetivo do projeto *EHT* era obter a imagem de um buraco negro cujo horizonte de eventos tem um diâmetro angular de $0,000016''$, esse telescópio deveria ter, no mínimo, uma resolução angular equivalente a esse ângulo (veremos que a resolução angular do *EHT* foi de $0,000025''$). Uma alternativa prática para melhorar a resolução angular seria observar numa radiação com menor comprimento de onda; outra seria aumen-

tar o diâmetro do telescópio, ou ainda combinar essas alternativas.

O comprimento de onda poderia ser diminuído observando-se em raios X, cuja emissão é intensa no disco de acreção. Mas observações astronômicas em raios X só podem ser feitas acima da atmosfera, não do solo. O observatório espacial de raios X Chandra tem resolução angular de $0,5''$, cerca de 30 mil vezes maior que o diâmetro de M87*. Mantendo o mesmo comprimento de onda, a abertura atual de 1,2 m precisaria ser aumentada 30 mil vezes, algo inviável no espaço no momento atual.

Usando luz visível, o telescópio deveria ter um diâmetro de cerca de 8 km, também inviável agora. Espelhos grandes tornam-se rapidamente mais pesados, portanto mais sujeitos a deformações e causadores de desalinhamento nos suportes e na montagem, dificultando um desempenho óptico satisfatório. Além disso, na luz visível os buracos negros supermassivos, que se encontram no centro de galáxias, são obscurecidos por nuvens de poeira, um obstáculo verdadeiramente desencorajador.

No fim foram escolhidos comprimentos de onda milimétricos (ondas de rádio) que são 2 mil vezes mais longos que os da luz visível. Com esses comprimentos de onda, a resolução necessária seria alcançada se o diâmetro do telescópio fosse da ordem do diâmetro do nosso Planeta. Obviamente não seria construído um radiotelescópio com essas dimensões, mas um interferômetro. Essa alternativa foi escolhida, tendo em vista vários fatores que conspiraram favoravelmente. Para as ondas milimétricas, mesmo as nuvens de poeira são relativamente transparentes e, assim, oferecem condições favoráveis para a observação de buracos negros e de seu entorno próximo. A *linha de base*²⁵ do interferômetro teria praticamente o tamanho do Planeta, mas o interferômetro seria integralmente instalado no solo. A interferência das ondas de rádio requer que as ondas recebidas simultaneamente em diferentes pontos da Terra, mantenham a fase (oscilações em uníssono). Isso é razoavelmente bem atendido pelas ondas milimétricas, mas não seria pela luz visível cuja propagação é suscetível a distorções severas e caóticas causadas pela turbulência atmosférica. Por fim, um fator quase decisivo foi a existência de vários

²⁵ Linha de base é a distância de separação entre as antenas que compõem um rádio-interferômetro.

radiotelescópios de tamanho adequado, já instalados em sítios escolhidos com severos critérios técnicos e geograficamente bem distribuídos no globo. A radioastronomia já tem alcançado resoluções angulares incríveis, muitas ordens de grandeza inferiores às dos maiores telescópios ópticos! Assim foi que oito rádio-observatórios formaram uma rede que foi articulada especificamente para a grande missão de obter a imagem de um buraco negro supermassivo. Essa rede *EHT* alcançou a resolução angular necessária, sem cobrir um hemisfério da Terra com uma antena.

6.4 Teoria de Fourier

Parece digressão, mas achei didaticamente conveniente, antes de abordar a rádio-interferometria, apresentar a Teoria de Fourier. Ela é assim chamada porque foi introduzida pelo matemático francês, também egiptólogo e administrador público Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). Ele desenvolveu as séries de Fourier enquanto solucionava o problema da condução do calor em placas metálicas, e estabeleceu que qualquer função periódica²⁶ com período P (que, obviamente, atenda certas condições matemáticas que não precisam ser destacadas aqui) pode ser representada por uma soma de senos e cossenos cujo ângulo cresce como múltiplo inteiro de $1/P$ ²⁷ e cuja amplitude, que quantifica a contribuição de cada termo na soma, deve ser calculada a fim de que a representação resulte satisfatória. Matematicamente a soma inclui infinitos termos, mas uma soma com número finito (muitas vezes baixo) de termos já fornece um resultado satisfatório na prática.

Uma função não necessariamente periódica do tempo (ou da posição numa direção do espaço), pode ser representada através da transformada de Fourier na forma de superposição de senos e cossenos de cada frequência temporal (o inverso de um intervalo fixo de tempo) ou espacial (o inverso de uma distância fixa). Na transformada todas as frequências são levadas em conta (não

só as frequências múltiplas e inteiras da frequência fundamental). Até frequências negativas são consideradas, mas estas não têm significado físico. São utilizadas por conveniência matemática.

Assim se estabelece uma equivalência entre uma função não periódica do tempo (ou de uma direção do espaço) e sua transformada de Fourier (doravante direi apenas transformada), pois são duas representações da mesma realidade. O que diferencia as duas representações é que a função opera no domínio do tempo (t) ou do espaço (x), enquanto a transformada opera no domínio das frequências, respectivamente, temporais ou espaciais.

A imagem de um astro visto no céu pode ser representada como a distribuição do brilho num plano $2D$ com coordenadas angulares x e y que representam distâncias angulares no céu. Essa é a representação no domínio do espaço. Sua transformada será representada também num plano $2D$, mas com coordenadas u e v , medidas em termos do comprimento de onda das estruturas que compõem a imagem. Esta é a representação no domínio das frequências espaciais.

Para ajudar a fixar as ideias, darei alguns exemplos. Para uma imagem no espaço real, formada por linhas ou barras escuras paralelas, a transformada consistirá em dois pontos em lados opostos do centro (dois pontos porque a frequência espacial é lida a partir do centro, ou seja, da frequência espacial nula). Esses pontos estarão mais perto do centro se a frequência espacial (inverso da distância de separação das linhas) for menor e vice-versa.

Se a imagem no espaço real for um fundo de brilho uniforme, a transformada consistirá num pequeníssimo ponto extremamente intenso no centro. Ele representa a contribuição de todos os pontos da imagem na frequência espacial nula (comprimento de onda infinito). Essa transformada é chamada delta de Dirac.

A imagem de um disco brilhante no centro de um fundo escuro terá como transformada um disco central também brilhante circundado por inúmero anéis concêntricos cujo brilho decresce conforme se afasta do centro, alternando-se com anéis escuros. É exatamente o diagrama de difração da luz que passa por um orifício redondo mostrado na Figura 11.

A Figura 12 é para mostrar visualmente como a imagem se altera aplicando-se filtros que re-

²⁶Uma função é periódica quando ela se repete da mesma forma a cada período P . Se a função representa uma variação no tempo (t), o período é um intervalo fixo de tempo; se a função representa uma variação numa direção do espaço (x), o período é um intervalo fixo de comprimento.

²⁷O número de frequências ($1/P, 2/P, 3/P...$) é infinito, mesmo assim muitas frequências intermediárias não são levadas em conta.

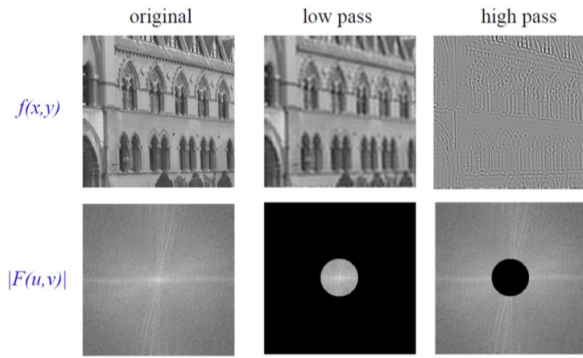


Figura 12: Em cima, da esquerda para a direita: imagem original; imagem filtrada para transmitir baixas frequências espaciais; imagem filtrada para transmitir altas frequências espaciais. Em baixo, as respectivas transformadas. A imagem filtrada no espaço real pode ser resgatada calculando-se a transformada da imagem no plano das frequências espaciais, feito o corte abaixo ou acima da frequência de corte. Mas, programas comuns de tratamento de imagens fazem filtragem na própria imagem: passa-baixo para desfocar ou embaçar e passa-alto para realçar detalhes. Crédito: A. Zisserman, Michaelmas 2014. Fonte: www.robots.ox.ac.uk/~az/lectures/ia/lect2.pdf.

movem as frequências espaciais mais altas ou mais baixas (olhos treinados percebem isso facilmente), e como isso se reflete na transformada da imagem.

6.5 Interferometria

O prelúdio sobre a Teoria de Fourier me permite apresentar agora a radio-interferometria como a técnica observacional de obtenção da função de visibilidade das franjas de interferência, que é a transformada da imagem do astro no domínio das frequências espaciais (u, v) . Aplicando depois a transformação de Fourier na transformada da imagem, conseguimos resgatar a função de distribuição da intensidade no plano (x, y) , ou seja, a desejada imagem do astro no céu. Simples assim!

Calcular a transformada de Fourier é uma tarefa laboriosa, mas hoje em dia isso ficou extremamente facilitado, graças à disponibilidade de programas e supercomputadores de alto desempenho.

O conceito central da rádio-interferometria é, portanto, que a transformada de Fourier da visibilidade das franjas permite reconstituir a distribuição de brilho do objeto observado na coordenada celeste paralela à linha de base. Mas esta afirmação só se sustenta se as ondas submetidas à interferência forem coerentes (manti-

verem a fase), ainda que parcialmente. Considerando que a emissão da radiação de um astro normalmente envolve um enorme número de partículas microscópicas independentes, dificilmente poderíamos esperar a recepção na Terra de ondas coerentes. Uma exceção seriam os masers astrofísicos, encontrados em nuvens densas do meio interestelar, que emitem em micro-ondas radiação coerente, como fazem os lasers na luz visível. Mas foi demonstrado um importante teorema que assegura que, mesmo que as ondas de astros reais sejam incoerentes, quando observadas de muito, muito longe elas nos aparentam serem coerentes. Então, sigamos adiante!

6.6 Interferômetros

Relembremos o diagrama de difração da Figura 10, produzido por uma única fenda de largura d . Na Figura 13, abaixo, ela está reproduzida na curva pontilhada em vermelho. Mas, neste novo experimento, a difração será causada não por uma fenda, mas por um par de fendas iguais de largura d , separadas por uma distância b (b , de linha de base). As novas fendas introduziram um maior número de novas fontes de ondas, o que tornou a interação entre as ondas mais complexa. Mas isso não impede que os lugares de interferência construtiva e destrutiva possam ser calculados e que a intensidade do brilho continue podendo ser predita para diferentes direções. O resultado é o padrão mostrado na Figura 13 pela curva contínua em vermelho.

Mantido o mesmo comprimento de onda, a largura da franja central para a dupla fenda é d/b vezes mais estreita que a da fenda única. Isso mostra que podemos obter a mesma resolução angular de uma fenda de largura b , mesmo com apenas duas pequenas aberturas separadas pela distância b .

Transpondo isso para telescópios, podemos obter a mesma resolução angular de um telescópio com espelho (ou lente) de diâmetro b , usando dois pequenos telescópios de diâmetro d separados pela distância b . Esse par de telescópios, obviamente conectados eletronicamente, forma o interferômetro. A vantagem prática do interferômetro é explorada pelos radioastrônomos na técnica *VLBI*, especialmente quando a linha de base cresce para milhares de quilômetros. Mas, atenção! A melhoria da resolução angular é na direção da reta que une os telescópios em operação,

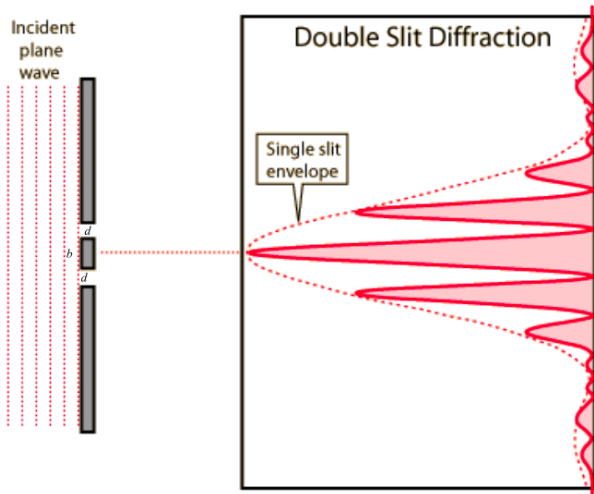


Figura 13: Difração com dupla fenda. O padrão da difração é formado por estreitas franjas luminosas alternadas por estreitas franjas escuras. Notar que o padrão da fenda única, com franja mais larga, é o envoltório do novo padrão. Ilustração adaptada pelo autor. Crédito: R. Nave. Fonte: hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/dslit.html.

ou seja, na direção da linha de base. No exemplo da Figura 13, na direção perpendicular à linha de base, a resolução angular continua sendo a mesma da fenda única.

6.7 Rádio-interferômetros

Num interferômetro de luz visível (óptico), as ondas produzidas pelas duas fendas sofrem interferência e se projetam numa tela produzindo, de uma só vez, o padrão de interferência com franjas brilhantes e escuras que se alternam. Num rádio-interferômetro de duas antenas a obtenção do padrão de interferência é mais trabalhosa. Em cada antena o campo elétrico da onda que chega através do espaço é captado por um dipolo, representado como uma cruz no foco da antena parabólica (Figura 14). Esse campo oscila na sua frequência, induz uma tensão alternada no dipolo que é transmitida através de um cabo coaxial.

Suponhamos que as duas antenas do interferômetro estejam fixamente apontadas para o zênite (Figura 14). Uma rádio-fonte pontual distante dará volta no plano do papel ao redor do interferômetro. Na Figura, a rádio-fonte encontra-se numa direção que faz o ângulo θ em relação ao zênite. A frente de onda proveniente da rádio-fonte pontual atingirá primeiro a antena da direita, depois a da esquerda. O atraso é porque o sinal da esquerda precisa percorrer uma distância maior.

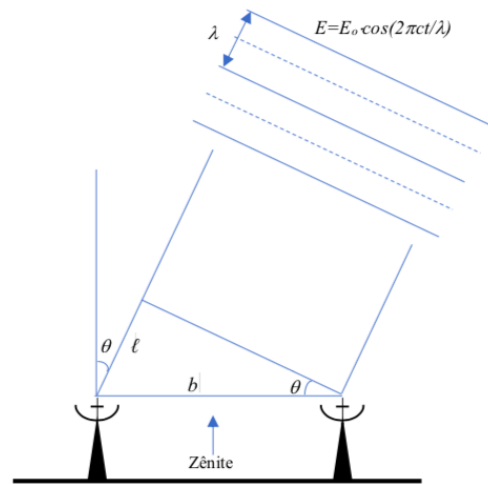


Figura 14: Um rádio-interferômetro com duas antenas fixas apontadas para o zênite (vertical do observador). As antenas aqui representadas são parabólicas, muito usuais, mas poderiam ser de outro tipo, por exemplo, espinha de peixe, simples cabos estendidos entre mastros etc. A linha de base é b . Ilustração do autor.

A diferença de trajeto é $l = b \sin\theta$, logo o atraso é $b \sin\theta/c$ já que a onda caminha com a velocidade da luz, c . Esse atraso pode ser expresso como uma diferença de fase igual a $2\pi b \sin\theta/\lambda$. Notar que a variável da diferença de fase é θ (a direção da fonte no céu), já que tudo o mais é constante.

Mas, se a rádio-fonte pontual estiver no zênite, $\theta = 0$, esse atraso será nulo, o que quer dizer que a frente de onda atinge as duas antenas ao mesmo tempo. Isso é verdade porque, nesse caso, a frente de onda será horizontal. A onda estará em fase nos dois dipolos, não havendo diferença de fase.

Para construir um rádio-interferograma é necessário que observemos a rádio-fonte pontual em diferentes direções θ . Uma vez fixada a direção θ , o sinal de cada dipolo convertido em voltagem segue através de dois cabos independentes para uma unidade eletrônica de correlação²⁸ na qual são multiplicados. Do sinal resultante é tirada uma média no tempo. Como produto final, a correlação fornece o seguinte par de dados: a medida da intensidade do sinal e o respectivo ângulo θ . Enquanto no interferômetro da luz visível, todas

²⁸Correlação é uma operação matemática usada na análise estatística de sinais. Consiste basicamente em comparar a semelhança entre dois sinais e detectar as diferenças que são quantificadas pelo coeficiente de correlação. Esse coeficiente varia entre -1 e +1. O sinal positivo (ou negativo) indica que quando um sinal cresce, o outro cresce (ou decresce). O valor unitário indica similaridade total, zero indica nenhuma relação discernível e, entre eles, temos todos os valores intermediários.

as franjas são produzidas de uma só vez pela própria luz incidindo na direção θ (como mostrado na Figura 10), no rádio-interferômetro o diagrama de interferência é construído através da obtenção de vários pares dos dados acima citados, variando-se θ .

Quando $\theta = 0$, como vimos, a onda estará em fase nos dois dipolos e ocorrerá interferência construtiva. O sinal será o mais intenso. Aumentando-se o valor de θ a intensidade flutuará periodicamente para valores decrescentes, dando lugar às franjas de interferência.

O diagrama de interferência de uma fonte pontual observada por um rádio-interferômetro também é chamado padrão de radiação desse rádio-interferômetro porque vale, tanto quando a radiação de uma fonte pontual distante é recebida, como também quando esse mesmo rádio-interferômetro estiver irradiando para o espaço. A direcionalidade com que uma antena recebe a radiação de uma fonte pontual distante, é a mesma com que ela transmite. Na prática, em radioastronomia o diagrama de radiação de um rádio-interferômetro pode ser levantado com as duas antenas apontadas fixamente para o zênite (como na Figura 14) observando-se a *passagem meridiana*²⁹ de uma rádio-fonte pontual distante. Como o diagrama de interferência vale na direção na linha de base, o rádio-interferômetro deve ter as duas antenas na direção $L - O$ para observar a passagem meridiana.

6.8 Fontes não pontuais

Afastemo-nos agora da ideia de rádio-fonte pontual e consideremos uma rádio-fonte com extensão angular, com estruturas e distribuição variada de brilho, como é o buraco negro supermassivo em pauta. A presença de “fontes adicionais” muda o diagrama de interferência aumentando a intensidade da radiação para as direções no céu onde haja estruturas brilhantes.

É fácil entender que a situação agora é mais complexa do que o padrão de interferência para uma fonte pontual. As “fontes adicionais” estarão em posições quaisquer e terão intensidades quaisquer. Com isso as franjas se deslocarão no eixo horizontal da diferença de fase, o que fará tam-

bém com que o valor mínimo das franjas deixe de ser nulo, o que implica em ambiguidade de formação sobre a intensidade e posição das duas fontes. Mas a correlação, neste caso, extrai das franjas de interferência a função de visibilidade (termo importantíssimo nesta discussão), onde visibilidade é a porcentagem da franja em que os sinais dos dois radiotelescópios na extremidade da linha de base mantêm coerência de fase. Seu valor máximo é 1, o que ocorre quando quando o valor mínimo é nulo; e seu valor é nulo quando o máximo e o mínimo se igualam. Entre esses extremos temos todos os valores intermediários.

A função de visibilidade pode ser expressa em função de $b \sin\theta/\lambda$ que é a linha de base do interferômetro projetada perpendicularmente à linha de visada, medida em número de comprimentos de onda da radiação. A função de visibilidade fornece, portanto, a distribuição da intensidade da fonte no céu, na direção da linha de base do par interferométrico, em termos da frequência espacial das suas componentes.

6.9 Síntese de abertura

A solução prática para a obtenção de imagem de um buraco negro supermassivo em ondas de rádio não consiste em construir antenas parabólicas cada vez maiores. Os maiores radiotelescópios direcionáveis para fontes celestes em diferentes posições do céu, já há muitas décadas não ultrapassam cerca de 100 m de diâmetro. A solução para alcançar alta resolução angular consiste em explorar os princípios da rádio-interferometria acima descritos, para se fazer a síntese de uma gigantesca abertura virtual (de vários milhares de km), sem preencher totalmente a abertura com uma gigantesca antena, mas usando apenas vários pares de antenas operando como rádio-interferômetros de dois elementos com linhas de base que podem chegar até a milhares de km.

Portanto, o que falei para linha de base em uma direção deve ser estendido para outras direções. Para a composição de uma imagem, não só a variedade de direções da linha de base interessa, como também a variedade de tamanhos, pois estes determinam a variedade de resoluções e todas elas são importantes. Quando uso vários telescópios formando o interferômetro, posso formar vários pares de telescópios com suas respectivas linhas de base de diferentes tamanhos e orientações. Se N é o número de radiotelescópios, o número de

²⁹A passagem meridiana ocorre quando um astro, em seu movimento diário de L para O , cruza o meridiano local (círculo da esfera celeste que passa pelos pontos cardeais N e S e pelo zênite do observador).

pares que pode ser formado é $N(N-1)/2$. O *EHT* tinha 8 radiotelescópios e cada um formando par com todos os demais, possibilitava 28 linhas de base. Portanto cada telescópio observando o buraco negro media a visibilidade da franja em 28 frequências espaciais e em 28 orientações da linha de base. A posição geográfica de cada radiotelescópio pode ser mapeada no plano (u, v) das frequências espaciais considerando-se o tamanho e a orientação das linhas de base. Fazendo a observação ao longo do dia, por causa da rotação da Terra os radiotelescópios descreviam as trajetórias elípticas desenhadas na Figura 15, possibilitando assim mudança de orientação das linhas de base.

Se é relativamente trivial fazer a correlação de sinais quando a linha de base é pequena, isso vai se complicando à medida que a distância aumenta. Com duas antenas próximas, os sinais podem ser transmitidos por cabos coaxiais, a diferença de fase é preservada e os sinais são correlacionados junto ao próprio par interferométrico. Se a linha de base é quilométrica, ainda é possível fazer a transmissão dos sinais por rádio-links até uma central onde é feita a correlação em tempo real. Mas, quando a distância chega a centenas de quilômetros, o grande número de estações repetidoras torna a transmissão impraticável.

A sigla *VLBI* corresponde à expressão *Very Long Baseline Interferometry*, Interferometria de Linha de Base Muito Longa. Uma linha de base muito longa tem comprimento de milhares de quilômetros, caso do *EHT*. Nesse caso os sinais já não podem ser transmitidos. Então, num passado ainda recente os dados passaram a ser gravados em fitas magnéticas que eram fisicamente transportadas para a central de correlação. A correlação então não era mais feita em tempo real. Em compensação, cada radiotelescópio precisava operar sob a batuta de um oscilador local de alta precisão. Passaram a ser usados relógios atômicos que tornaram-se comercialmente disponíveis desde os anos 1960 e foram se tornando cada vez mais precisos. Hoje os relógios atômicos mais precisos são controlados por masers do átomo de hidrogênio, cuja oscilação na famosa linha espectral de 21 cm tem estabilidade de frequência com tolerância de desvio menor que 1 s em 100 milhões de anos. Então cada telescópio envolvido na missão observacional, é apontado para o mesmo alvo e coleta os dados simultaneamente, mas os da-

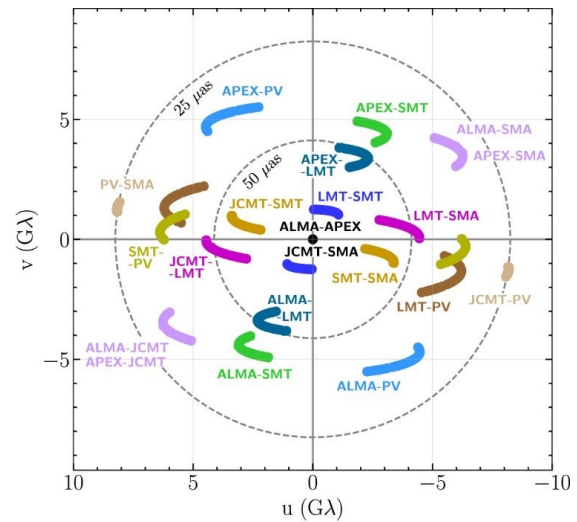


Figura 15: As coordenadas u e v são das frequências espaciais medidas em unidades do comprimento da onda de rádio λ . Na Figura, $G\lambda = 1$ bilhão de comprimentos de onda de 1,3 mm. Isto equivale a milhares de km entre os radiotelescópios dos pares com as maiores linhas de base. Os círculos tracejados mostram que aumentando-se a linha de base, a resolução angular diminui, isto é, melhora (μs : micro arc second = 0,000001"). Os telescópios formando pares foram posicionados no plano (u, v) de modo que, para cada par interferométrico, os telescópios fossem equidistantes ao centro ($u = 0, v = 0$). Assim, podemos ver nesta Figura a síntese de uma abertura de dimensão planetária. As siglas legendadas reaparecem na Figura 16 e designam cada rádio-observatório. Notar que os radiotelescópios ALMA e APEX, assim como JCMT e SMA, formam pares cujos telescópios se encontram próximos, por isso encontram-se praticamente no centro do gráfico. O telescópio SPT utilizado para calibração não aparece aqui. Cada telescópio fazia medições formando par com cada um dos demais telescópios para medir a visibilidade das franjas com diferentes frequências espaciais e diferentes orientações da linha de base. As 28 frequências espaciais estavam confinadas entre 0,000025" e 0,000160". A Figura mostra a cobertura das medições no plano (u, v) , mas não as medições. Imagem do artigo [2]. Fonte: doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7.

dos são gravados com a marcação horária de alta precisão (timestamp). A precisão do tempo, importante para o sincronismo dos dados a serem coletados enquanto a Terra gira e, depois, correlacionados, é mantida dentro de 0,000000001 s (1 ns: 1 nanossegundo). Esse sincronismo assegura a posteriori, isto é, no replay dos dados coletados, o preciso apontamento simultâneo para a fonte observada de todos os telescópios que compõem o interferômetro, como se fosse um único radiotelescópio rígido.

Mesmo hoje, o streaming de dados digitais de banda larga tem taxa de transmissão lenta para a enorme massa de dados que precisa ser trans-

mitida para a correlação. Os dados digitalizados de cada radiotelescópio foram, portanto, gravados em discos rígidos de alta densidade, mantidos à baixa temperatura do hélio líquido (para não introduzir ruído térmico) e transportados fisicamente à central de correlação. Só o transporte físico dos discos rígidos demorou dois anos. Os dados da Antártida, por exemplo, ficavam vários meses inacessíveis no inverno.

6.10 EHT

Com o *EHT*, num ousado programa de colaboração internacional, foi feita a síntese de abertura do tamanho da Terra para a captura da primeira imagem de um buraco negro supermassivo.

O projeto *EHT* foi lançado em 2009, após um longo período de estudos teóricos e instrumentais. Do lado teórico foi estudada a órbita dos fótons nas proximidades de um buraco negro com rotação, e foram feitas as primeiras simulações de como esses fótons sofreriam deflexões pelo campo gravitacional do buraco negro, eventualmente orbitariam ao redor dele antes de viajarem em direção a um observador distante. Isso era necessário para a predição de como *Sagittarius A** deveria aparecer nas imagens que não eram na luz visível, mas em ondas de rádio. Os ensaios instrumentais tinham começado em 2006 com o uso da técnica *VLBI* em comprimentos de onda cada vez mais curtos, e possibilitaram concluir que era viável a obtenção de imagem de alta resolução da região do horizonte de eventos de *Sagittarius A**, assim como do buraco negro supermassivo *Virgo A*.

As observações que produziram a primeira imagem foram feitas em cinco dias de abril de 2017. Por sorte, a equipe pôde contar com céu claro nesses dias em todos os observatórios. As observações geraram 4 PB (petabyte = quatrilhão de bytes³⁰) de dados coletados na velocidade de 128 Gb/s.

Eis os oito radio-observatórios em seis localidades, que ajudaram a compor a rede *EHT* (Figura 16): antena APEX de 12 m de diâmetro e o arranjo ALMA com 54 antenas de 12 m e 12 de 7 m, ambos no deserto de Atacama, no Chile; o radiotelescópio PV de 30 m em Sierra Nevada, na Espanha; a antena de 15 m do Telescópio James C. Maxwell (JCMT) e o Arranjo Submilimétrico de 8 antenas de 6 m (SMA) em Mauna

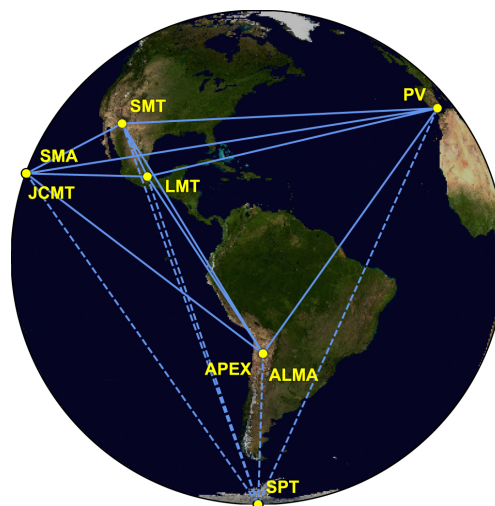


Figura 16: Radiotelescópios da rede *EHT*. Imagem do artigo [2]. Fonte: iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7/pdf.

Kea, Havaí; o Grande Telescópio Milimétrico de 50 m (LMT) no vulcão Sierra Negra, no México; o Telescópio Submilimétrico de 10 m no Mount Graham (SMT), no sudeste do Arizona; o radiotelescópio de 10 m (SPT) na Estação Polo Sul, na Antártida. O par de telescópios mais afastados era o da Espanha e Polo Sul com uma linha de base próxima ao diâmetro da Terra. Maior linha de base na superfície da Terra, impossível! No comprimento de onda de 1,3 mm, a resolução angular alcançada foi de 0,000025”.

Os supercomputadores utilizados estavam no Max Planck Institut für Radioastronomie em Bonn, Alemanha, e no MIT Haystack Observatory em Westford, MA (Figura 17). Para correlacionar os sinais foi feito o replay dos dados, em paralelo, de cada antena interferométrica. Mantendo o melhor sincronismo possível, era preciso introduzir a diferença de fase entre os sinais dos dois observatórios que formavam cada par interferométrico.

A matéria-prima bruta das observações do programa *EHT* é a franja de visibilidade de toda a rede de radiotelescópios em função da frequência espacial da distribuição de brilho na fonte. Mas os dados brutos foram submetidos a um primeiro tratamento chamado autocalibração, que utiliza a própria fonte observada para equalizar a resposta das diferentes antenas, para corrigir erros na diferença de fase causados pela propagação na atmosfera terrestre e para ajustar a banda passante de frequências.³¹ A função de visibilidade

³⁰1 byte = 1 unidade de informação (letra, algarismo etc.) representada em geral por 8 dígitos binários (bits).

³¹A banda passante é a faixa de rádio-frequências ao



Figura 17: MIT é o famoso Massachusetts Institute of Technology e o MIT Correlator é um poderoso supercomputador que faz a correlação matemática bilhões de vezes por segundo entre os sinais dos pares de antenas que podem ser formados entre os 8 radiotelescópios do *EHT*. Crédito: Nancy Wolfe Kotary, MIT Haystack Observatory. Fonte: www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2019/06/26/black-hole-data-processing-storage/#1d03f69b5bca.

já feita a autocalibração é mostrada na Figura 18.

A partir da função de visibilidade da Figura 18, uma primeira imagem foi obtida, chamada imagem suja porque ainda inclui ruídos espúrios. O primeiro deles é a recepção de sinal espúrio pelo espaço livre deixado entre as antenas (não preenchimento da abertura). Então fracos sinais de fundo captados por franjas secundárias³² podem se acumular e contribuir com sinal espúrio significativo. Há ainda os ruídos de fontes cósmicas que nada têm a ver com o objeto de estudo, e os de fontes terrestres. Estas podem ser naturais, geradas na atmosfera (por exemplo, relâmpagos) ou antropogênicas (rádio-comunicações). Tem ainda o ruído gerado pelo próprio instrumento! Por isso partes críticas de radiotelescópios são refrigeradas a baixas temperaturas, como a do hélio líquido. Além disso, na medida do possível os radiotelescópios são instalados em locais afastados de grandes centros, hoje invadidos por toda sorte de ruído eletromagnético.

A imagem limpa é obtida submetendo a imagem suja a uma operação chamada deconvolução

redor da frequência nominal de observação. Já disse antes que não há onda de rádio perfeitamente monocromática. Uma dispersão em frequência é inescapável, até porque as ondas chegam em pacotes, isto é, dentro de um intervalo de tempo finito. A frequência só seria única (monocromática) se as ondas chegassem o tempo todo, isto é, num intervalo de tempo infinito.

³²As franjas secundárias encontram-se angularmente distantes do eixo óptico dos telescópios. A Figura 18 mostra que as franjas foram truncadas a partir da terceira. A capacidade das franjas secundárias de captar sinais é fraca, mas sendo muitas, seu efeito cumulativo pode se tornar significativo.

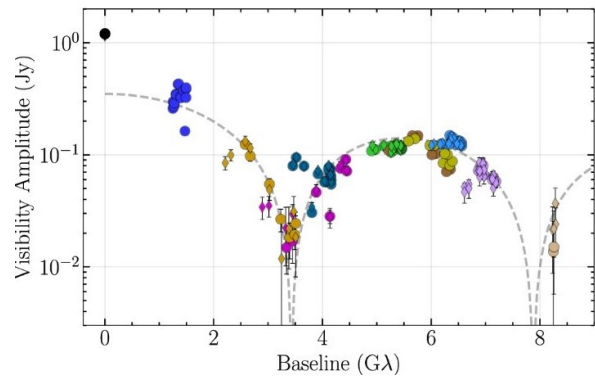


Figura 18: Função de visibilidade do *EHT*, já autocalibrada para o buraco negro supermassivo M87* em função frequência espacial. Os pontos aqui mostrados correspondem só à metade da informação que estava disponível (só para frequências espaciais positivas). A curva tracejada é a transformada de Fourier calculada para um fino anel com diâmetro angular de $0,000046''$ aqui apresentada apenas para comparação. O espalhamento dos pontos no primeiro mínimo se deve a que os pontos correspondem a diferentes orientações da linha de base e também indicam falta de simetria circular na distribuição do brilho da fonte. Imagem do artigo [2]. Fonte: iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ab0ec7/pdf.

que consiste basicamente numa filtragem ou eliminação de estruturas mais extensas (com comprimentos de onda maiores), sob a suposição de que essas estruturas, pelo menos na maioria, são espúrias. A deconvolução é uma operação matemática que tenta restaurar o sinal original eliminando contribuições indesejadas. Para isso, para cada caso é modelada empiricamente uma função chamada Função de Espalhamento do Ponto a ser usada na deconvolução. Considerando a escassez de pontos na abertura sintetizada e os ruídos de toda sorte presentes nos dados, acho que esta é a parte mais dependente de escolhas arbitrárias dos responsáveis pelo tratamento de dados onde, portanto, contribuí mais a arte do que a ciência.

Por fim, na tentativa de validar pelo menos as principais estruturas quanto à sua objetividade, quatro equipes processaram todos os dados separada e independentemente, usando diferentes algoritmos e testando-os contra diferentes modelos. Ao final se verificou que as imagens produzidas pelas diferentes equipes tinham similaridade, inclusive com as imagens produzidas antes por simulação, o que sugeriu a robustez das observações e que os resultados mereciam credibilidade. Comparações foram feitas entre imagens obtidas em quatro diferentes datas. A recompensa segundo os pesquisadores envolvidos foi poder con-

firmar na prática e com razoável detalhe, as consequências previstas pela teoria da relatividade geral numa circunstância em que a gravidade tem intensidade extrema.

7 Conclusão

De tudo isso, qual seria a real importância para cada um de nós, cidadãos? Não se trata apenas da aquisição de um novo conhecimento para ampliar nossa erudição, mas da expansão do nosso conhecimento sobre o universo, a casa em que moramos, o lugar que nos deu o privilégio de surgirmos como seres vivos e pertencentes à espécie humana. Sempre estaremos perguntando: de onde viemos? para onde vamos? mas, quanto ao nosso presente, além de quisermos manter nossa permanência neste mundo, nenhuma vocação nos é mais inata do que esquadrihar curiosamente cada cômodo da nossa casa, saber com que tijolos ela foi construída, até onde vai o quintal. Acho que essa eterna curiosidade é que dinamiza nossas principais aptidões e nos torna plenamente humanos, além de legar como subprodutos, conhecimentos e ferramentas para a sobrevivência da espécie a longo prazo (legados da ciência pura).

Não ficaremos necessariamente mais ricos nem poderosos, porém, mais conscientes de onde estamos, mais aptos a interagir não só com o universo paroquial, mas com tudo o que seja vivo ou não, que também faça parte do universo observável.

Afinal, até 46,5 bilhões de anos-luz, tudo é o meio ambiente que nos pertence. Acha pouco?

Agradecimentos

Agradeço a Domingos Soares, professor aposentado do Departamento de Física da UFMG, por me atender pronta e gentilmente quando o

consultei sobre detalhes da participação de Karl Schwarzschild na obtenção da solução exata para as equações de campo de Einstein, utilizada na descrição de buracos negros. Agradeço também ao Sérgio Bisch, diretor do Planetário de Vitória, e Júlio Fabris, professor do Departamento de Física da UFES e editor de Cadernos de Astronomia, do Núcleo de Astrofísica e Cosmologia da UFES, pelo generoso convite para contribuir no número inaugural dessa revista.

Sobre o autor

Oscar T. Matsuura (oscarmatsuura@gmail.com) possui bacharelado em filosofia e em física, mestrado em radioastronomia solar e doutorado em física de cometas. No Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG/USP) liderou o grupo de astrofísica do sistema solar e fez aplicações da magnetohidrodinâmica em estruturas da atmosfera solar e cauda de cometas. Uma vez aposentado, dedicou-se à divulgação da astronomia e estudos em história da astronomia no Brasil.

Referências

- [1] I. D. Soares, *São os buracos negros reais?* (2018), disponível em lilith.fisica.ufmg.br/~dsoares/extn/brcs/bhno-p.pdf (acesso em 13 jul. 2020).
- [2] The Event Horizon Telescope Collaboration et al., *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole*, *Astrophys. J. Lett.* **875**, L1–L17 (2019).

O experimento de Tales

Richard Kerner

Sorbonne-Université, Paris, França

Resumo

Há mais de 2500 anos, o filósofo grego Tales de Mileto descobriu um teorema geométrico que lhe permitiu avaliar a altura da Grande Pirâmide no Egito comparando o comprimento de sua sombra com o comprimento da sombra projetada pelo bastão vertical ao mesmo tempo. Ao fazer isso, Tales estava usando três definições independentes de linha, e geometria em geral, provenientes de três reinos da física: gravidade, física quântica e atômica, e ótica. No presente trabalho analisamos as implicações físicas e filosóficas da coincidência entre três definições de espaço físico e sua geometria.

Abstract

More than 2500 years ago ancient Greek philosopher Thales of Miletus discovered a geometrical theorem that enabled him to evaluate the height of Great Pyramid in Egypt comparing the length of its shadow with the length of shadow cast by vertical stick at the same time. By doing so, Thales was using three independent definitions of straight line, and of geometry in general, coming from three realms of physics: gravity, quantum and atomic physics, and optics. In the present paper we analyze physical and philosophical implications of the coincidence between three definitions of physical space and its geometry.

Palavras-chave: Tales de Mileto, geometria, física

Keywords: Thales of Miletus, geometry, physics.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31678](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31678)

1 Introdução: Tales e a Grande Pirâmide

Tales de Mileto ($\Theta\alpha\lambda\eta\sigma$, 625–547 A.C.) foi considerado pelos gregos antigos como um de seus *Sete Sábios*, o pai da abordagem científica para a descrição dos fenômenos naturais e, talvez, a primeira pessoa merecedora do título de matemático. Ficou famoso pela sua predição do eclipse solar de 585 A.C., e pela sua capacidade de avaliar dimensões de objetos distantes, através da comparação de suas sombras com a sombra de um bastão de dimensão conhecida.

A relação de proporcionalidade usada por Tales para determinar a altura da Grande Pirâmide, no Egito, também é uma introdução à *dependência linear*, que constitui a essência da álgebra linear. Essa experiência fundamental tornou-se tão comum que seus aspectos físicos raramente são considerados de maneira mais detalhada.

De fato, Tales realizou um importante experimento físico relacionando diferentes definições de geometria; para ser mais preciso, as noções de re-

tas e ângulos retos. Acontece que, os fenômenos envolvidos neste experimento pertencem a diferentes domínios da física: gravitação, mecânica quântica e eletromagnetismo. O fato de que eles levam a três definições diferentes de geometria, mas compatíveis entre si, sugere que esses aspectos distintos da realidade física aparentemente estão relacionados. Esse fato dá origem a uma das questões mais importantes e fundamentais sobre a física e a nossa percepção do mundo físico, ainda em aberto depois de mais de vinte e cinco séculos.

2 As três definições de geometria

Vamos analisar as premissas e hipóteses que permitiram a Tales chegar às suas conclusões e formular o teorema das linhas paralelas que interceptam duas linhas que formam um ângulo entre si.

As duas primeiras suposições são que, na Figura 1, o segmento de reta OQ' no solo é real-

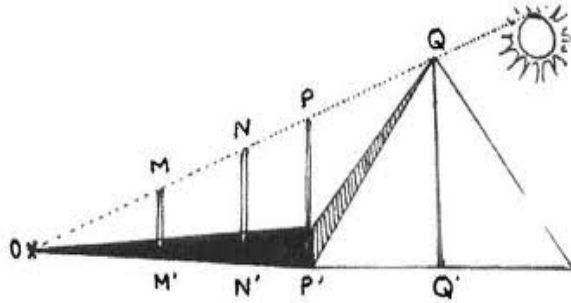
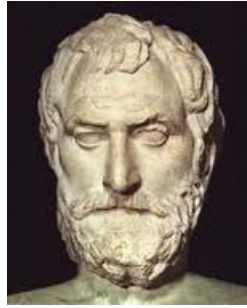


Figura 1: Tales de Mileto e a representação esquemática do seu experimento: as razões entre os comprimentos dos objetos verticais e as próprias sombras são constantes, $MM' : OM' = QQ' : OQ'$.

mente uma linha reta, e que os dois segmentos, a altura da pirâmide QQ' e o bastão MM' também são retas e formam o mesmo ângulo com a linha do solo $OM'Q'$ (neste caso, o ângulo reto de 90°). Esta é uma afirmação física e o fato de os dois objetos serem retos e verticais pode ser verificado usando os instrumentos conhecidos, baseados na exploração da gravidade.

Ambos os instrumentos mostrados na Fig. (2) são baseados no uso do campo gravitacional da Terra, que define localmente planos com direções verticais e horizontais (superfícies equipotenciais). O fato dos dois segmentos serem verticais e retos baseia-se no pressuposto de que a corda sustentando um objeto pesado no campo gravitacional na superfície da Terra pode servir como definição de uma *linha reta vertical*. A horizontalidade do solo pode ser verificada usando o mesmo princípio. Para ser mais preciso, o fato de que a corda que suporta o objeto pesado adquire uma forma reta é devido à tensão à qual a corda está submetida por causa da força gravitacional.

Uma linha reta pode ser obtida dessa maneira mesmo dentro de um satélite artificial que orbita em torno da Terra, na ausência de forças gravitacionais, ou seja, na total ausência de peso. Qualquer fio elástico sujeito a tensão assumirá a forma de uma linha reta. A tensão pode ser causada por forças que nada têm a ver com gravitação - por

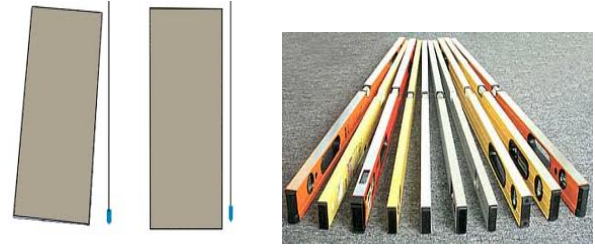


Figura 2: Dois instrumentos usados para verificar se uma linha reta ou um plano é vertical ou horizontal.

exemplo, a força dos nossos músculos, ou algum dispositivo mecânico ou elétrico.

No entanto, a gravitação da Terra é crucial para definir o *ângulo reto* entre a superfície horizontal do solo e as duas linhas retas *distantes*, a altura da pirâmide QQ' e o bastão MM' , determinando assim o que geralmente é chamado de *paralelismo distante*.

Embora o teorema de Tales pareça envolver exclusivamente relações espaciais entre linhas retas de um certo tipo, idealizando a interação espacial entre objetos físicos, o *tempo* está implicitamente envolvido em hipóteses físicas necessárias para justificar o resultado das medições de Tales.

Quando Tales estava realizando o seu experimento, a Grande Pirâmide tinha mais de 2000 anos, o que aliás explica por que as suas dimensões exatas tinham sido esquecidas há muito tempo. Um pressuposto tácito era que ela mantivesse a sua forma inicial, incluindo todos os ângulos e dimensões. Mesmo excluindo a ocorrência de eventos sísmicos, Tales ainda tinha que admitir que as pedras que formavam a pirâmide tinham mantido sua forma inalterada por longos períodos de tempo.

O fato que o bastão também permanecesse reto e rígido deve-se a uma suposição semelhante, a saber, que ele é feito de um material cuja coesão é suficiente para manter sua forma inalterada (essa é uma definição comum de um corpo sólido). Como visto da nossa perspectiva atual, essa hipótese é baseada na suposição que os átomos possam formar estruturas estáveis capazes de se manter inalteradas sob condições razoáveis (por exemplo, a temperatura ambiente não excedendo certos valores). Do ponto de vista quadridimensional, isso significa que átomos e moléculas podem seguir geodésicas de tipo tempo paralelas, com desvio geodésico nulo.

Aliás, a capacidade de átomos e moléculas de formarem estruturas periódicas estáveis torna



Figura 3: Cristais de sal comum $NaCl$, de quartzo SiO_2 e um exemplo de retículo cristalino (SiO_2 - wurtzite). As forças interatômicas impõem as formas e a geometria dos corpos sólidos.

possível uma alternativa definição de linhas retas e ângulos retos (e não somente retos). Os cristais representados na Fig. (3) mostram uma estrutura linear notável, bem como ângulos aparentemente perfeitos, de 90° no caso da estrutura cúbica do $NaCl$, e de 60° e 120° no caso de quartzo (SiO_2).

As linhas retas e os ângulos retos obtidos da maneira tradicional, usando um compasso, uma régua e uma folha de papel, baseiam-se no mesmo princípio físico, que é a existência de corpos sólidos que sirvam como padrões de comprimento. A geometria baseada nas formas dos corpos sólidos é independente do campo gravitacional que determina linhas verticais paralelas e o plano horizontal no experimento de Tales. Do ponto de vista atual, a existência de configurações estáveis de átomos, bem como a existência dos próprios átomos, pode ser entendida somente usando os princípios da mecânica quântica, que até agora parecem ser independentes dos fenômenos gravitacionais.

Mas este não é o fim da história. Um terceiro tipo de linha reta está envolvido no experimento,

o raio de luz ao longo da linha $QPNMO$. O caráter desta linha é devido às propriedades de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo (na medida em que a influência do ar possa ser negligenciada), que *a priori* é independente dos fenômenos gravitacionais, bem como das forças predominantes em nível atômico. As frentes de onda e os raios de luz fornecem uma noção alternativa de linhas retas e de ângulos, resultando na *geometria conforme*, que preserva as noções de linhas retas e ângulos, mas ignora as noções de comprimento e distância.¹

3 Os três reinos do mundo físico

Os resultados do experimento de Tales podem ser interpretados de duas maneiras. De fato, ele estabeleceu a coincidência de três definições completamente diferentes de uma linha reta. A primeira veio da forma natural que uma corda com um corpo pesado preso a uma de suas extremidades adquire sob a influência do campo gravitacional da Terra.

O campo gravitacional define também o ângulo reto entre o solo horizontal e duas linhas verticais distantes, a altura da pirâmide e do bastão. A expressão matemática dessa afirmação é dada pela função potencial $U(x, y, z)$, que define as *superfícies equipotenciais*, $U = \text{constante}$. Na superfície da Terra essa equação define o plano horizontal e a direção vertical, pois temos

$$dU = \mathbf{grad} U \cdot d\mathbf{r} = 0, \quad (1)$$

com o vetor

$$\mathbf{grad} U = \left[\frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial U}{\partial y}, \frac{\partial U}{\partial z} \right], \quad (2)$$

definindo localmente a direção vertical, enquanto todos os deslocamentos ortogonais a ela definem (localmente) um plano horizontal.

A segunda definição vem da forma material do bastão. A existência de corpos sólidos que podem ser usados como padrões de comprimentos e ângulos resulta de propriedades de simetria das forças interatômicas, que por sua vez podem ser

¹Tales fez também uma suposição tácita extra, a saber, que as propriedades usadas para a definição de linhas retas, paralelismo e ângulos retos, fossem independentes da escala, ou seja, fossem as mesmas para o pequeno bastão e para a Grande Pirâmide. A extensão para dimensões ainda maiores, incluindo os Céus, também parecia óbvia.

derivadas *ab initio* de acordo com as regras da mecânica quântica, válidas em escala atômica.

A terceira linha reta é dada pelo raio de luz, que vem de uma idealização da propagação de ondas eletromagnéticas de uma fonte muito distante. A luz do sol que ilumina a Terra é bem descrita por uma onda plana:

$$A \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}), \quad (3)$$

com frentes de onda planares implicitamente dadas pela equação $\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = \text{constante}$. Os raios são paralelos ao vetor de onda \mathbf{k} , em todos os lugares perpendiculares às frentes de onda planares.

A primeira interpretação do experimento, que coincide com o interesse de Tales, baseia-se na suposição de que todas as definições de linhas retas e ângulos coincidem, o que lhe permitiu avaliar a altura da Grande Pirâmide.

A segunda interpretação seria, com a altura da pirâmide considerada uma quantidade conhecida, bem como a altura do bastão, ver o resultado do experimento de Tales como uma prova de que os raios de luz seguem linhas retas compatíveis com as duas definições que envolvem gravitação e forças interatômicas. Ou então, que as linhas retas e os ângulos retos definidos por meio do campo gravitacional coincidem com os definidos por meio de raios de luz e de bastões sólidos.

As três definições alternativas de geometria envolvidas no experimento de Tales estão diretamente relacionadas a três diferentes aspectos de nossa percepção da natureza. Desde o advento da física moderna, a descrição do mundo que nos cerca é baseada em três reinos essenciais, já presentes no experimento de Tales, que são

- **Espaço e tempo,**
- **Corpos materiais,**
- **Forças agindo entre eles.**

Os três principais aspectos de nossa percepção da realidade física podem ser vistos distintamente na equação fundamental que expressa a segunda lei da dinâmica de Newton:

$$\mathbf{a} = \frac{1}{m} \mathbf{F}. \quad (4)$$

Esta equação mostra a relação entre três reinos diferentes que são dominantes em nossa percepção e descrição do mundo físico: corpos massivos (m), campos de força responsáveis pelas interações entre os corpos (\mathbf{F}) e relações espaço-temporais definindo a aceleração (\mathbf{a}).

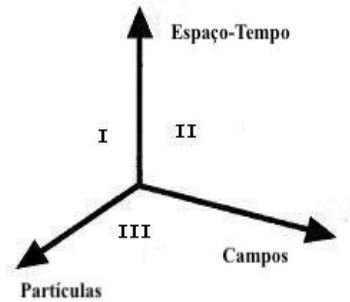


Figura 4: Os três reinos da física.

Os mesmos três ingredientes são encontrados na física das interações fundamentais: falamos de partículas elementares e campos em evolução no espaço e no tempo, formulamos deliberadamente a lei da dinâmica de Newton de uma maneira um pouco não usual, $\mathbf{a} = \frac{1}{m} \mathbf{F}$, para separar a entidade diretamente observável (\mathbf{a}) do produto de duas entidades cuja definição é muito menos direta e clara.

Além disso, colocando a aceleração sozinha no lado esquerdo, destacamos a relação causal entre o fenômeno: a força é a causa da aceleração da massa sob sua influência, e não vice-versa.

Na linguagem moderna, a noção de força é geralmente substituída pelo novo conceito de campos de vários tipos.

O fato dos três ingredientes estarem relacionados pela equação (4) poderia sugerir que talvez apenas dois deles são fundamentalmente independentes, sendo o terceiro a consequência dos dois restantes.

Vamos representar os três aspectos das teorias das interações fundamentais por três eixos ortogonais, conforme mostrado na figura a seguir, que exhibe também três opções possíveis de dois aspectos independentes da realidade física, dos quais devemos supostamente poder derivar o terceiro.

As tentativas de entender a física com apenas dois dos reinos representados na Figura 4 tem uma história muito longa. Eles podem ser divididos em três categorias, rotuladas como I, II e III.

Na categoria I podemos reconhecer facilmente a física newtoniana, apresentando o mundo físico como uma coleção de corpos materiais (partículas) evoluindo no espaço e no tempo absolutos, interagindo a distância. Newton considerava a luz feita de minúsculas partículas elásticas obedecendo às mesmas regras da mecânica como todos os corpos materiais. A noção de campos que

transmitiam forças de um corpo para outro estava totalmente ausente.

A controvérsia sobre a natureza da luz levou a profundas diferenças na interpretação do espaço. Para Huygens, que forneceu uma prova da propagação da luz em forma de onda, o espaço deve ser preenchido com algum meio que permita a propagação. Duas visões diametralmente opostas sobre o status do espaço e do movimento prevaleceram desde então. A visão newtoniana foi reforçada por Immanuel Kant, que elevou o status do espaço para a categoria independente e absoluta, existindo independentemente dos observadores, como o céu estrelado e o “imperativo moral” [2].

As teorias pertencentes à categoria II assumem que o mundo físico pode ser descrito exclusivamente como uma coleção de campos em evolução na variedade espaço-temporal. Essa abordagem foi defendida por Lord Kelvin, A. Einstein e, mais tarde, por J.A. Wheeler. O impulso inicial foi dado por Faraday e J.C. Maxwell, que introduziram um ponto de vista revolucionário, antinewtoniano, segundo o qual nenhuma interação a distância é possível. Todas as forças são transmitidas por um meio; o espaço é preenchido por esse meio. Este pode ser chamado de “éter”, e os campos de forças se tornam um novo reino físico, identificado como tensões dentro do éter, que em certo sentido é o espaço. Em certo sentido, o “espaço” se torna sinônimo de “contínuo material”, assim como, do ponto de vista de um peixe, sua separação espacial de outro peixe pode ser definida como a quantidade de água contida entre os dois.

Como seguidor de Maxwell e Faraday, Einstein acreditava no papel primordial dos campos e tentava derivar as equações de movimento como comportamento característico das singularidades dos campos ou da curvatura do espaço-tempo. Pode-se dizer que, na visão de Einstein, os campos substituíram o éter [3].

No espírito do programa de F. Klein, H. Minkowski definiu a geometria hiperbólica do espaço unida à tempo em uma única entidade chamada *variedade espaço-temporal*. Sua geometria foi definida pela ação do Grupo de Lorentz-Poincaré. No entanto, olhando mais de perto, entidades fisicamente mensuráveis que são submetidas às transformações de Lorentz (os “quadrivetores”) não são de jeito nenhum as coordenadas do tempo

e do espaço, mas as quantidades físicas conservadas, como a energia E e o momento \mathbf{p} , ou a frequência ω e o vetor de onda \mathbf{k} de uma onda eletromagnética (ou mais precisamente, de um fóton).

O espaço-tempo minkowskiano herda a simetria de Lorentz-Poincaré porque é definido através de medições baseadas em fótons e suas interações com elétrons, cuja energia, momento e spin são quantidades covariantes de Lorentz e abrangem os espaços de representação do grupo de Lorentz-Poincaré.

A categoria III representa o ponto de vista alternativo de supor que a existência de matéria é prioritária com relação à do espaço-tempo, que se torna um domínio “emergente” - um eufemismo para “ilusão”. Essa abordagem foi defendida recentemente por N. Seiberg e E. Verlinde [11].

É verdade que as coordenadas do espaço-tempo não podem ser tratadas da mesma maneira como quantidades conservadas, como energia e momento; muitas vezes esquecemos que elas existem enquanto marcadores, e tratá-las como objetos reais é um “mau hábito”, como comentado por D. Mermin [4].

Vista sob esse ângulo, a ideia de derivar as propriedades geométricas do espaço-tempo, e talvez a sua própria existência, a partir de simetrias fundamentais e interações típicas dos constituintes mais elementares da matéria parece bastante natural. Muitas dessas propriedades não requerem menção de espaço e de tempo no nível da mecânica quântica, como foi demonstrado por M. Born e W. Heisenberg [5–7] em sua versão da mecânica matricial, ou pela formulação da teoria quântica de J. von Neumann em termos das álgebras C^* [8]. A geometria não comutativa é outro exemplo de formulação de relações espaço-temporais em termos puramente algébricos [9, 10].

Considerando a física quântica como a principal realidade subjacente da qual os objetos clássicos são uma versão média, leva-se a concluir que as propriedades quânticas de objetos físicos devam estar intimamente relacionadas à definição de geometria em primeiro lugar.

4 O experimento de Tales na perspectiva de hoje

Voltemos ao experimento realizado por Tales mais de vinte e cinco séculos atrás. De acordo

com nossa análise, podemos reconhecer a qual reino físico pertence cada uma das três definições de linha reta. As duas linhas verticais paralelas, a altura da pirâmide e o bastão são feitos de madeira e pedra, que mantêm sua forma devido ao seu estado sólido. Sendo feitos de átomos, a existência e as propriedades de tais sólidos podem ser derivadas das regras da mecânica quântica. Este é o reino das partículas com massa: núcleons e elétrons, que formam átomos, depois moléculas e, finalmente, sólidos cristalinos ou amorfos estáveis. As forças eletromagnéticas também desempenham um papel importante, mantendo os elétrons ao redor dos núcleos e criando os residuais potenciais de Lennard-Jones fora dos átomos, dando origem às forças de Van der Waals.

Os raios de luz que criaram a sombra da pirâmide assim como a do bastão são, como sabemos agora, o inumerável enxame de fótons criando uma frente de onda plana comum. Eles são identificados com um campo de calibre sem massa, pertencendo assim ao reino das forças que tornam possível a interação entre partículas carregadas massivas. A interação entre os fótons e elétrons das camadas atômicas externas é descrita de maneira mais adequada pelas regras da física quântica.

Somente o terceiro lado de cada um dos dois triângulos que aparecem no experimento de Tales, as linhas verticais paralelas, parecem não ter nada a ver com a física quântica, suas direções sendo definidas pelo campo gravitacional da Terra. Mas após uma análise mais detalhada, podemos concluir que, mesmo neste caso, os dispositivos feitos de sólidos são necessários para detectar a presença de gravitação, e as informações sobre seu comportamento são realizadas por fótons.

Nesse ponto, podemos perguntar se o experimento de Tales poderia ser realizado sem gravidade - e a resposta é "sim". Para construir um plano e duas linhas paralelas verticais, os padrões sólidos de comprimento e ângulo reto seriam suficientes, isso pode ser feito com régua e compasso comuns. Portanto, a experiência seguindo o esquema de Tales pode ser vista como a verificação se as leis da gravidade são compatíveis com a geometria definida por corpos sólidos e luz, ou seja, pelo limite clássico da mecânica quântica e da teoria quântica de campos. A propósito, com medições muito precisas de ângulos, poderíamos descobrir a curvatura real da superfície

da Terra, porque as direções verticais definidas pelo seu campo gravitacional não são paralelas de verdade: uma distância de cerca de 31 metros corresponde a um segundo de arco entre as direções verticais locais definidas pela gravitação da Terra.

A presente análise do experimento de Tales sugere que, entre os três reinos da física representados na Figura 4, partículas e campos (física quântica) definem a geometria quando constituem objetos clássicos como corpos sólidos e frentes de onda, enquanto a presença ou ausência de gravitação é verificada com a ajuda de outros objetos clássicos. Em termos muito aproximados, corpos sólidos feitos de átomos e frentes de onda feitos de fótons existem, apesar da existência ou não da gravidade; pelo contrário, a gravidade, assim como a geometria do próprio espaço-tempo, é definida pelas propriedades de corpos sólidos e raios de luz. A própria detecção de efeitos gravitacionais não pode ser realizada sem corpos massivos extensos, que se comportem como objetos clássicos. Até o famoso experimento confirmando a variação do tempo próprio sob a influência da gravidade, realizado por Pound e Rebka [12] em 1959, usa o efeito Mössbauer com base no comportamento coletivo da rede cristalina que cancela o efeito de recuo durante a absorção de fótons.

O teorema de Tales liderou o caminho para todas as medições subsequentes de grandes distâncias, primeiramente na terra e no mar, depois aplicadas à medição do raio da Terra, por Eratóstenes, e em seguida para determinar distâncias astronômicas, por Aristarco de Samos. Mais tarde, a medição da distância até as estrelas mais próximas, devido à paralaxe anual observada, foi apenas outra aplicação do Teorema de Tales. A determinação da forma das órbitas planetárias por Kepler foi baseada em triangulação, que também é uma variante do mesmo teorema. A determinação subsequente das verdadeiras dimensões do Sistema Solar foi feita apenas em 1769, graças à observação do trânsito de Vênus e ao conhecimento exato da longitude pelo capitão Cook, que realizou as observações na ilha de Taiti. A medida crucial foi relacionada ao tempo exato do fenômeno, como observado de lugares distantes na Terra. A longitude pôde ser determinada também devido à invenção do cronômetro por Huygens.

Como a velocidade da luz no vácuo é constante

para todos os observadores galileanos, hoje em dia as medições de distâncias no espaço podem ser substituídas por medições precisas de atrasos temporais, como no sistema de posicionamento global (GPS). E não é acidental que distâncias muito grandes são medidas em equivalentes temporais, os anos-luz. As medidas exatas do tempo, que hoje em dia atingem a precisão de 10^{-15} segundos, nos permitem determinar distâncias com um grau de precisão semelhante - menos de 1 cm na superfície do nosso globo. Tais medições de tempo são possíveis devido aos relógios atômicos que obedecem às regras da mecânica quântica.

Toda a informação que recebemos do mundo ao nosso redor é transportada por fótons, léptons e bárions, partículas elementares cujas propriedades e comportamento são extremamente bem descritos pela física quântica. No entanto, podemos percebê-los e analisá-los somente através de dispositivos que representam o limite clássico da mecânica quântica. Não é surpreendente que a geometria construída na base dos dados obtidos reflete o grupo de simetria que atua no espaço dos estados das partículas elementares - o grupo de Lorentz-Poincaré. As propriedades de transformação de entidades físicas conservadas, como os quadrivetores $k^\mu = [\frac{\omega}{c}, \mathbf{k}]$ ou $P^\mu = [\frac{E}{c}, \mathbf{p}]$ são estendidas ao *espaço dual* das formas diferenciais $dx_\mu = [cdt, dx]$. Estas, por sua vez, são definidas experimentalmente usando objetos clássicos, cuja própria existência (corpos rígidos formados por átomos, frentes de onda de luz feitas de fótons) é explicada pela teoria quântica.

Assim, a conclusão no caso do experimento de Tales é que, para construir a geometria euclidiana do espaço, apenas esses dois fenômenos físicos eram necessários, a luz desempenhando o papel de régua (definindo as linhas retas) e os corpos rígidos desempenhando o papel de compasso (definindo distâncias). A gravidade foi usada para definir linhas retas paralelas e ângulos retos, mas seu uso não era necessário. Pelo contrário, sua influência pode ser medida usando objetos exclusivamente clássicos.

Aparentemente, a gravitação pode ser percebida apenas no limite clássico, e não no nível quântico. Apesar de numerosas tentativas, não há limite quântico da física clássica. Isso sugere duas conclusões:

Primeiro, que o espaço e sua geometria são definidos apenas no limite clássico da teoria quântica;

Segundo, que a gravidade também é um fenômeno clássico, aparecendo apenas quando os efeitos coletivos podem ser percebidos, assim como a termodinâmica clássica pode ser definida apenas como um limite da física estatística.

Nesse caso, quantizar ondas gravitacionais é uma tarefa tão arriscada quanto uma tentativa de quantizar as ondas na superfície da água.

Nota dos editores

Artigo submetido aos CdA em inglês e traduzido ao português por Oliver F. Piattella.

Sobre o autor

Richard Kerner (richard.kerner@sorbonne-universite.fr) é professor emérito da Université Pierre et Marie Curie (Sorbonne-Université), em Paris, França. É autor de mais de 200 artigos científicos. O primeiro deles, publicado em 1968, antes de iniciar seu doutoramento, foi um marco em física teórica ao incorporar conceitos das modernas teorias das interações fundamentais às chamadas teorias de Kaluza-Klein, que foram formuladas originalmente nos anos 20 e que procuravam unificar as interações fundamentais estendendo o número de dimensões do espaço-tempo. Desenvolve pesquisas em física-matemática, gravitação, física de altas energias e física da matéria condensada. Possui três livros publicados, um sobre a teoria da relatividade restrita, outro sobre métodos geométricos para materiais amorfos e, mais recentemente, sobre métodos clássicos em física teórica.

Referências

- [1] I. Newton, *Philosophia Naturalis Principia Mathematica* (Pepys, London, 1687); new English edition (Snowball publishing, Chicago, 2010).
- [2] I. Kant, *Critique of Pure Reason* (Cambridge University Press, Cambridge, 1998); see also Michael Friedman, *Kant and the Exact Sciences* (Harvard University Press, Cambridge, 1992).

- [3] A. Einstein, L. Infeld, *The evolution of physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1938)
- [4] D. Mermin, *What is bad about this habit*, Physics Today **62**, 8-9 (2009).
- [5] M. Born, P. Jordan, *Zur Quantenmechanik*, Z. Phys. **34**, 858-878 (1925).
- [6] W. Heisenberg, *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, Z. Phys. **33**, 879-893 (1925).
- [7] P.A.M. Dirac, *The Principles of Quantum Mechanics* (Oxford Univ. Press, Oxford, 1958).
- [8] J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (Princeton Univ. Press, Princeton, 1996).
- [9] M. Dubois-Violette, R. Kerner, J. Madore, *Non-commutative differential geometry of matrix algebras*, J. Math. Phys. **31**, 316-322 (1990).
- [10] A. Inoe, *Extension of unbounded left Hilbert algebras to partial algebras*, J. Math. Phys. **31**, 323-331 (1990).
- [11] E. Verlinde, *On the Origin of Gravity and the Laws of Newton*, arXiv:1001.0785 (2010).
- [12] E. Pound, G.A. Rebka Jr., *Gravitational redshift in nuclear resonance*, Phys. Rev. Lett. **3**, 439-441 (1959).

Os primeiros telescópios

Renato Las Casas

Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo

Não sabemos quem inventou o telescópio. São apresentados indícios que nos permitem supor ser essa uma invenção anterior ao século XVII. Com base em pesquisa realizada por Pierre Borel em meados do século XVII, Zacharias Janssen é apresentado como um possível inventor. Os primeiros telescópios construídos por Galileo Galilei são descritos, assim como as “grandes descobertas astronômicas” realizadas por ele. São apresentados os desafios que se seguiram para a melhoria desse invento que levaram, dentre outras coisas, à invenção do telescópio refletor.

Abstract

We don't know who invented the telescope. Evidence is presented that allows us to assume this was an invention prior to the 17th century. Based on research by Pierre Borel in the mid 17th century, Zacharias Janssen is presented as a possible inventor. The first telescopes built by Galileo Galilei are described, as well as like the “great astronomical discoveries” made by him. The challenges that followed to improve this invention that led, among other things, to the invention of the reflecting telescope

Palavras-chave: telescópio, astronomia.

Keywords: telescope, astronomy.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.30856](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.30856)

1 Introdução

Embora muitas vezes atribuído a Galileo Galilei, o certo é que não sabemos quem e nem quando o telescópio foi inventado. Existem relatos que nos permitem supor que o telescópio foi inventado séculos antes de Galileo, que viveu de 1564 a 1642. A tecnologia que resultou no telescópio teve início aproximadamente em 3.500 a.c., quando os Fenícios, fazendo fogo sobre areia, descobriram o vidro. A primeira lente possivelmente surgiu em 424 a.c. Nessa data, Aristóphanes usou uma esfera de vidro cheia de água para concentrar os raios solares sobre palha seca e fazer fogo. No século II de nossa era, Ptolomeu escreveu sobre as propriedades da luz: cores; reflexão e refração. Na Europa, lentes de superfícies convexas (convergentes) foram popularizadas no século XIV e lentes de superfícies côncavas (divergentes) no século XV. Essas lentes eram usadas, quase que exclusivamente, para correção da visão de quem tinha hipermetropia (imagem focada atrás da retina; correção com lente convergente) e miopia

(imagem focada antes da retina; correção com lente divergente). Porém, já por volta de 1230, Robert Grosseteste, um político, filósofo escolástico, teólogo, cientista e bispo da ordem dos franciscanos em Lincoln na Inglaterra, trabalhando em um dos grandes centros de aprendizagem em Oxford (que já era considerado uma “faculdade”) escreveu um livro intitulado “De Luce”(Sobre a Luz) onde relata o uso de um instrumento para “. . . fazer coisas distantes parecerem do tamanho que se quiser, tal que possamos ler pequenas letras a distâncias incríveis.” Em 1266 um discípulo de Grosseteste, Roger Bacon, também um padre inglês da ordem dos franciscanos e filósofo, físico, teólogo, musicólogo, teórico musical, astrólogo, alquimista, tradutor, inventor e matemático, que estudou nas universidades de Oxford e Paris, no capítulo VI de seu tratado “Opus Majus” (A Obra Principal) nos fala de um telescópio e de um microscópio, assim como prevê invenções como máquinas voadoras e barcos a vapor. Em 1580, Taqi al-Din um teólogo muçulmano turco, responsável pela criação do Observatório de Constantino-



Figura 1: Frontispício de “O Verdadeiro Inventor do Telescópio”, de Pierre Borel.

pla (para o qual desenvolveu vários instrumentos como relógios mecânicos e uma enorme esfera armilar) e autor de mais de noventa livros sobre uma grande variedade de assuntos (incluindo astronomia, engenharia, matemática, mecânica, óptica e teologia) aparentemente descreve um telescópio rudimentar em sua obra intitulada “Livro da Luz”. Em 1610, Giovanni Battista della Porta (criptógrafo, matemático, físico, químico, inventor, dramaturgo, filósofo, médico, astrólogo e astrônomo italiano) foi convidado a fazer parte da “Accademia Nazionale dei Lincei” (fundada em Roma em 1603 com o objetivo de ser um local de encontro e um ponto de apoio ao desenvolvimento das ciências). Na Accademia dei Lincei, della Porta reivindicou (sem muita convicção) haver sido o inventor do telescópio, que já havia se tornado conhecido na Itália daquela época através de Galileio Galilei.

2 Zacharias Janssen

Se eu tiver que fazer uma aposta em quem inventou o telescópio, diria que foi Zacharias Janssen. Faria essa aposta com base em um livro publicado em 1655 por Pierre Borel.

Pierre Borel foi um químico (também tido como alquimista), botânico, físico e biógrafo francês nascido em 1620. Em 1654 se tornou físico de Louis XIV, rei da França. Em sua época as descobertas astronômicas feitas com o uso do telescópio já haviam mudado o mundo, fornecendo

argumentos irrefutáveis de que a Terra não era o centro do Universo mas apenas um dentre vários outros planetas orbitando o Sol. Mas quem haveria inventado esse instrumento fantástico, fundamental para tais descobertas? Para responder essa questão Pierre Borel pesquisou, viajou, entrevistou dezenas de indivíduos e chegou à conclusão de haver sido Zacharias Jansen, óptico fabricante de lentes do norte da Holanda. As razões de Pierre Borel haver chegado a essa conclusão foram publicadas em seu livro “O Verdadeiro Inventor do Telescópio”. Zacharias era filho de Hans Jansen, também óptico. Os dois, pai e filho, também teriam inventado o microscópio.

Sabemos muito pouco sobre Zacharias Jansen. Durante a Segunda Guerra Mundial grande parte das informações que tínhamos sobre ele se encontravam na cidade de Middelburg na Holanda (onde passou grande parte da sua vida) e foram destruídas por um ataque aéreo alemão.

Sabemos entretanto que ele não era muito bem visto pela sociedade da época. Por diversas vezes teve problemas com a justiça, especialmente por falsificações de dinheiro. Ele teria inclusive inventado o microscópio com o objetivo de criar um dispositivo que lhe permitisse copiar as moedas com a maior precisão possível. O fato de não ter tido uma boa reputação pode explicar, pelo menos em parte, dificuldades que teve para ser reconhecido na época em que viveu como o inventor do telescópio.

3 Thomas Harriot

Os primeiros telescópios eram tidos como “brinquedos que permitiam ver as coisas mais de perto”.

Em abril de 1609 pequenos telescópios que ofereciam aumentos de três ou quatro vezes já eram comercializados em Paris e possivelmente em Londres. O sucesso desses instrumentos, principalmente entre espectadores de ópera, era tão grande que em julho daquele ano eles já eram encontrados à venda em praticamente toda grande cidade europeia.

Em 5 de agosto Thomas Harriot, astrônomo e matemático algebrista inglês, realizou a primeira observação celeste com telescópio que temos notícia. Harriot observou a Lua com um aumento de seis vezes. A má qualidade do instrumento usado

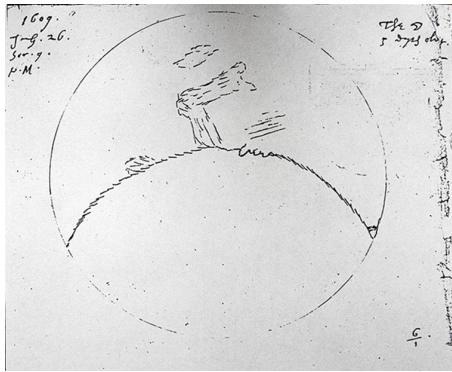


Figura 2: Esboço “A Superfície Lunar” desenhado por Thomas Harriot em 5 de Agosto de 1609.

por Harriot se expressa no esboço da superfície lunar feito por ele naquela ocasião.

4 Galileo Galilei

Galileo teria conhecido uma dessas lunetas vendidas para expectadores de ópera em maio de 1609 e logo previu o seu grande potencial como instrumento científico. Galileo construiu seu primeiro telescópio durante julho e agosto daquele ano. Esse foi um instrumento muito simples, que não apresentava novidades aos telescópios já encontrados à venda nas grandes cidades europeias. Na realidade, Galileo duplicou um telescópio que havia ganho, procurando entender tudo sobre aquele instrumento. O primeiro telescópio construído por Galileo apresentava aumento de três vezes. Imediatamente após a conclusão desse instrumento, Galileo deu início à construção de um aparelho “bem melhorado”. No dia 21 de agosto, na torre de São Marco em Veneza, Galileo apresentou às autoridades locais, com grande sucesso, seu telescópio de oito vezes de aumento, procurando obter financiamento para a construção de um aparelho ainda melhor. Galileo obteve o financiamento desejado.

O terceiro telescópio construído por Galileo, por ser o instrumento com o qual Galileo realizou as célebres observações que mostraram ao mundo que a Terra é apenas mais um planeta em órbita do Sol, é considerado por muitos o instrumento científico mais importante da história da humanidade. Esse telescópio ficou pronto em novembro de 1609. Ele era constituído basicamente por um tubo de 92,7 cm de comprimento com um “porta lente” em cada extremidade e apresentava aumento de quase 21 vezes. Esse instrumento se



Figura 3: O Telescópio das “Grandes Descobertas” exposto no Instituto e Museu de História da Ciência em Florença.

encontra em exposição no “Instituto e Museu de História da Ciência” em Florença, na Itália. Galileo construiu um instrumento luxuoso, coberto com couro vermelho (que com o tempo se tornou amarronzado) e todo desenhado com ouro. A rigidez do tubo é dada por pequenas ripas de madeira frinchadas que se encaixam lado a lado e são apertadas pelo couro. A lente ocular (que fica voltada para o olho do observador) original se perdeu e foi repostada no século XIX por uma (como acreditávamos ser a original) com os dois lados côncavos; 22 mm de diâmetro; 1,8 mm de espessura central e -47,5 mm de distância focal. Essa era uma lente divergente. Interessante notar que Galileo se manteve sempre fiel às oculares divergentes mesmo após Kepler em 1611 mostrar vantagens no uso de oculares convergentes. A lente objetiva (que fica voltada para o objeto observado) original ainda existe (mesmo quebrada). Ela é uma lente convergente, tem um lado plano e o outro convexo; 37 mm de diâmetro; 2,0 mm de espessura central e 980 mm de distância focal. Galileo a montou com o lado plano para dentro do tubo e com um anel de couro que permitia uma abertura efetiva de 15 mm.

As primeiras anotações científicas feitas por Galileo a partir de imagens visualizadas com esse telescópio teriam sido feitas em Pádua, na noite de 30 de novembro de 1609. Foram dois esboços da irregular superfície lunar feitos com tinta e pincel em uma folha de papel especial para pintura. Em dezembro de 1609, Galileo acrescentou outras quatro imagens lunares à essa folha. Contrariando um pensamento que vinha desde a Grécia antiga Galileo verificou que a Lua não era uma “esfera perfeita”, mas possuía montanhas e crateras. As “coisas do céu” não eram “aquela perfeição” que Aristóteles pregou e que, não apenas coincidentemente, no início do século XVII era um pensamento sustentado principalmente por

aqueles que afirmavam que a Terra era o centro do Universo. Em uma série de observações realizadas na primeira quinzena de janeiro de 1610, Galileo observou quatro “estrelinhas” companheiras de Júpiter, que seguiam esse planeta, girando ao seu redor. Foram assim descobertas as 4 maiores luas de Júpiter, hoje chamadas de “galileanas” em homenagem ao seu descobridor. Galileo sabia que um dos principais questionamentos que vinha sendo feito por aqueles que insistiam na teoria geocêntrica, era “-Como uma Terra em órbita em torno do Sol, podia levar a Lua junto com ela?”. Todos concordavam que Júpiter se movia no espaço (em órbita em torno do Sol ou em órbita em torno da Terra) e o telescópio estava mostrando que mesmo assim Júpiter conseguia arrastar com ele objetos girando em seu entorno. A descoberta das luas galileanas eram evidências muito fortes de que a Terra poderia não estar parada no centro do Universo.

Em fevereiro Galileo observou campos estelares. Para todo local que apontava seu telescópio Galileo verificava a existência de um número muito grande de “estrelinhas” impossíveis de serem vistas a olho nu. Galileo passou a acreditar que as nebulosas e a própria Via Láctea nada mais eram do que aglomerados de inúmeras dessas “pequenas” estrelas.

Essas primeiras descobertas feitas com o terceiro telescópio que Galileo construiu foram publicadas em março de 1610, na obra intitulada “Sidereus Nuncius” (“Mensageiro das Estrelas”). A pressa que Galileo teve em publicar tais descobertas foi tão grande que, em um processo considerado muitíssimo rápido até nos dias atuais, o tipógrafo de Veneza publicou “Sidereus Nuncius” apenas cerca de sessenta dias depois dessas últimas descobertas.

Ainda com o terceiro telescópio que construiu, em julho de 1610 Galileo descobriu os anéis de Saturno (embora não entendeu o que eram aquelas “orelhas” ou “saliências laterais” ao lado do planeta) e de outubro a dezembro daquele mesmo ano descobriu que Vênus apresenta fases como a nossa Lua. Não sabemos o número exato, mas é provável que Galileo tenha fabricado dezenas de telescópios ao longo de sua vida. Ele fabricava e vendia telescópios como uma forma de completar o seu parco salário de professor. Todos os telescópios construídos por Galileo que temos notícia tinham lente objetiva convergente e lente ocular di-

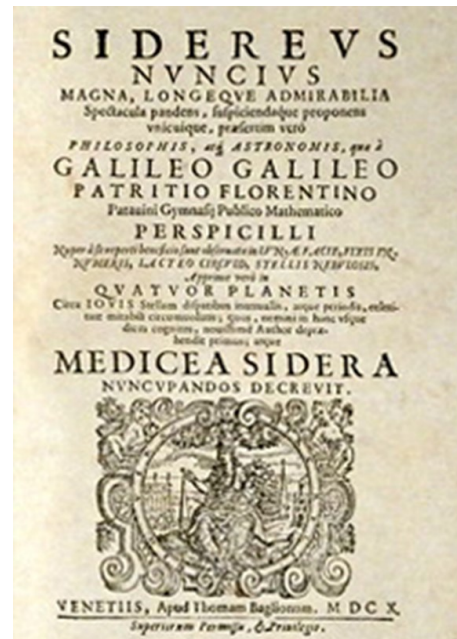


Figura 4: Frontispício de “Mensageiro das Estrelas”, de Galileo Galilei.

vergente. Uma primeira evolução significativa do telescópio foi trocar a lente ocular divergente por uma lente, assim como a objetiva, também convergente. Essa foi uma contribuição de Johann Kepler para o desenvolvimento do telescópio que Galileo, talvez por rivalidade com Kepler, nunca aceitou.

5 Johann Kepler

Em 1611, no livro “Astronomiae Pars Optica”, Kepler apresenta um novo tipo de telescópio, com duas lentes convergentes. Com elas, apesar de se ter imagens invertidas, se ganha muito no tamanho do campo de visão. Telescópios com oculares divergentes têm pequenos campos de visão que diminuem drasticamente com o aumento da imagem obtida.

Na prática, com os telescópios “keplerianos”, passava-se a se construir telescópios com aumentos cada vez maiores. No século XVII, fora as “grandes descobertas” realizadas por Galileo, todas as demais descobertas astronômicas relevantes foram feitas com a utilização de telescópios desse tipo.

Na década de 1640, por exemplo, Franciscus Fontana, astrônomo italiano, utilizando um telescópio “kepleriano”, descobriu faixas equatoriais na superfície de Júpiter e manchas na superfície

de Marte. Giovanni Battista Riccioli, também astrônomo italiano, observou sombras das luas de Júpiter no corpo do planeta; o que demonstrava que Júpiter não tinha luz própria, mas era iluminado pelo Sol, assim como a Terra. Em 1650 Riccioli descobriu um par de estrelas duplas.

6 Problemas

À medida que se tentava a fabricação de telescópios com melhores imagens, alguns problemas (ou desafios) surgiam. Cedo se verificou que lentes com superfícies que tivessem a forma de parte da superfície de uma esfera (lentes esféricas) não convergiam os raios de luz que passassem por elas para um único ponto, “borrando” a imagem obtida. A esse fenômeno foi dado o nome de aberração esférica. As imagens também costumavam apresentar “halos” coloridos no seu entorno. A esse fenômeno, mesmo não entendido imediatamente, foi dado o nome de aberração cromática (ocorre devido ao fato dos raios de luz de diferentes cores que passam por uma lente, serem desviados em ângulos diferentes, não convergindo para um mesmo ponto).

Em 1638, René Descartes (filósofo, físico e matemático francês) apresentou a solução teórica para o problema da aberração esférica na obra “A Dióptrica”. Willebroerd Snellius, matemático holandês mais conhecido por Snell, havia observado que se um raio de luz passa de um meio para outro (por exemplo do ar para o vidro) ele será desviado de um ângulo que dependerá das características físicas (à qual chamou índice de refração) dos dois meios. Segundo Descartes, utilizando a “Lei de Snell”, poderiam então ser desenhadas e fabricadas lentes que não apresentassem aberração esférica. Como disse, Descartes apresentou uma solução apenas teórica para o problema. Na época não havia tecnologia para a fabricação de lentes que não fossem esféricas. Mas a própria “Lei de Snell” mostrava que se usassem lentes objetivas de grande distância focal (pequena parte da superfície de uma esfera de grande raio) o problema da aberração esférica seria minimizado (na prática verificou-se algo semelhante para o problema da aberração cromática).

Mas objetiva de grande distância focal implicava em telescópios com tubos de grandes comprimentos. A segunda metade do século XVII foi marcada pela construção de telescópios cada vez

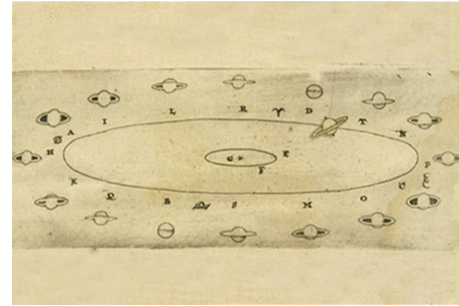


Figura 5: Esboço “Saturno e Seu Anel” desenhado por Christiaan Huygens e publicado em “Systema Saturnium”.

maiores, que não apenas implicavam em melhores imagens como também em maiores aumentos.

7 Christiaan Huygens

Um dos maiores observador, fabricante de lentes e construtor de telescópio de todos os tempos foi o holandês Christiaan Huygens.

Em 1655 Huygens construiu um telescópio com lente objetiva plano convexa de 5,7 centímetros de diâmetro; 3,37 metros de distância focal e aumento de 50 vezes. Foi com esse telescópio que no dia 25 de março daquele ano, procurando resolver o problema das “orelhas de Saturno” narrado por Galileo, Huygens descobriu Titã, a maior lua desse planeta.

Huygens não viu as “orelhas” de Saturno naquela oportunidade, pois hoje sabemos, a Terra estava passando pelo plano dos anéis de Saturno; o que não permitiu a visualização desses anéis. À medida que a Terra foi se afastando do plano dos anéis de Saturno esses foram surgindo gradativamente para os telescópios de Huygens. Em 1659, na obra “Systema Saturnium”, Huygens anunciou serem as tais “orelhas” de Saturno anéis muito finos centrados no planeta e explicou suas mudanças de forma. Grande parte das observações de Saturno Huygens fez com um telescópio de 7 metros de distância focal e aumento de 100 vezes.

Huygens continuou construindo telescópios cada vez maiores, chegando a construção de um com 37 metros de comprimento e não completando o projeto de outro de 65 metros (chegou a fabricar a lente objetiva, com 23 centímetros de diâmetro). Uma nova dificuldade se apresentava para a construção de telescópios tão grandes. Como construir tubos suficientemente rígidos para manter as lentes objetiva e ocular em

suas devidas posições qualquer que fosse o posicionamento do telescópio?! Huygens tentou solucionar esse problema com a construção de um “telescópio aéreo”, onde o aparato que continha a objetiva e o aparato que continha a ocular eram ligados apenas por um cordão. Se você movimentasse a ocular, a objetiva deveria se movimentar de tal forma a manter sempre o seu alinhamento com a primeira. Essa não foi uma ideia bem sucedida.

8 Johannes Hevelius

Um outro grande fabricante de telescópios do século XVII foi Johannes Hevelius, político e astrônomo polonês que em 1641 construiu um importante observatório no telhado de sua casa em Gdansk. Esse observatório chegou a ser equipado com um telescópio de 18 metros de comprimento.

O maior telescópio construído por Hevelius, entretanto, foi um gigante com 45 metros de comprimento. Esse era um telescópio de muito difícil operação; “tremia como vara verde” ao sopro de uma leve brisa e era muito difícil conseguir e manter o alinhamento entre a ocular e a objetiva devido a flexões do sistema que as deveria manter posicionadas.

Assim como o telescópio de 37 metros de Huygens, o telescópio de 45 metros de Hevelius pouco acrescentou ao conhecimento astronômico da época. Do observatório do telhado de sua casa Hevelius descobriu cometas; mapeou manchas solares; mapeou a superfície lunar; etc.

Sua mais importante obra foi “Selenographia sive Lunae Descriptio”, publicada em 1647. Essa obra tornou Hevelius conhecido como “fundador da topografia lunar”.

9 Telescópios Refletores

Paralelamente ao desenvolvimento dos primeiros telescópios refratores (chamamos assim aos telescópios em que o elemento óptico principal é uma lente), uma nova ideia começou a ganhar força: - Porque não construir telescópios com espelhos côncavos ao invés das lentes objetivas convergentes até então utilizadas? Os defensores dessa ideia acreditavam que se poderia construir espelhos objetiva maiores que as lentes objetiva ao mesmo tempo em que se resolveria o problema

da “aberração cromática” (o ângulo que um espelho reflete um raio de luz independe da cor da luz).

Basicamente, um espelho côncavo faz o mesmo que uma lente convergente: ambos convergem os raios de luz que chegam até eles. A diferença é que os raios de luz atravessam a lente e são convergidos para detrás dela; ao passo que os raios de luz são refletidos pela superfície do espelho e são convergidos para a região na frente do espelho. (No espelho os raios de luz incidentes e refletidos se superpõem em uma mesma região do espaço).

10 Niccolò Zucchi

Quem primeiro tentou colocar essa nova ideia em prática foi Niccolò Zucchi, astrônomo e físico jesuíta italiano. Em seu livro “Optica pilosophia”, publicado em 1652, Zucchi relata que muitos anos antes (em 1616) ele havia tentado produzir imagens com um espelho côncavo de bronze e uma lente ocular.

Os primeiros resultados obtidos não o encorajaram a prosseguir com o experimento. “-Se a ocular fica na frente do espelho, quando tentamos observar, nossa cabeça impede da luz do astro chegar ao espelho; se tentamos deslocar a ocular lateralmente, quanto maior for esse deslocamento, menos luz do astro chega à ocular.”

11 Marin Mersenne

Em 1636, Marin Mersenne, matemático e filósofo jesuíta francês, publicou o livro “Harmonie Universelle” onde apresenta a ideia de um telescópio com dois espelhos côncavos um voltado para o outro. O maior deles receberia a luz diretamente do objeto observado e a refletiria até o segundo espelho que novamente a refletiria para um orifício no centro do primeiro espelho. Após passar por esse orifício, o raio de luz chegaria à lente ocular que formaria a imagem para o observador. Consta que René Descartes haveria desestimulado Mersenne de prosseguir com essa ideia

12 James Gregory

James Gregory, matemático e astrônomo escocês, em 1663, em seu livro “Optica Promota”, foi além de Mersenne e determinou a forma exata que

os espelhos côncavos deveriam ter (ligeiramente hiperboloide e elipsoidal). Porém naquela época não havia tecnologia para a produção dos espelhos com as formas necessárias. O primeiro telescópio “Gregoriano”, que hoje é uma realidade, só foi fabricado no século XVIII.

13 Isaac Newton

O primeiro telescópio refletor (chamamos assim aos telescópios em que o elemento óptico principal é um espelho) só foi construído efetivamente em 1668. Seu inventor foi Isaac Newton (alquimista, filósofo natural, teólogo, matemático e físico inglês). O sistema óptico de um telescópio “Newtoniano” é constituído por três elementos: um espelho primário côncavo (que recebe o feixe de luz diretamente do objeto observado); um pequeno espelho secundário plano (que desvia ortogonalmente o feixe de luz após esse incidir no espelho côncavo) e uma lente convergente.

Talvez pelo fato de Newton não ser astrônomo (ele não tinha aquele “tesão” pra ver as coisas do céu) ou talvez mesmo por puro pragmatismo, ele não se preocupou em construir um telescópio com “a melhor imagem possível”. Newton não se preocupou com a aberração esférica. A principal função do primeiro telescópio construído por Isaac Newton foi mostrar que telescópios refletores eram possíveis e que esses não apresentavam aberração cromática.

Em seus estudos da decomposição da luz, Newton entendeu que a origem da aberração cromática estava no fato de raios de luz de cores diferentes serem desviados diferentemente quando da passagem de um meio para outro (por exemplo: do ar para o vidro e do vidro para o ar). Mas em um espelho isso não acontecia. A direção em que a luz é refletida por um espelho independe de sua cor, dependendo apenas da direção de incidência do raio de luz sobre a superfície do espelho.

O primeiro telescópio construído por Newton tinha espelho de pouco mais de três centímetros de diâmetro e dezesseis centímetros de distância focal e era feito de “speculum” uma liga de cobre e estanho que quando polida refletia relativamente bem os raios de luz. Com esse telescópio foi possível ver as luas de Júpiter que haviam sido descobertas por Galileo e, também assim como Galileo, acompanhar as fases de Vênus.

Newton construiu pelo menos mais uma versão



Figura 6: O “Telescópio Newtoniano” exposto no British Museum em Londres.

de seu telescópio; versão essa que em 11 de janeiro de 1672 apresentou à Royal Society de Londres. Esse aparelho, um pouco maior que o primeiro, com cinco centímetros de diâmetro, encontra-se preservado e exposto no “British Museum”.

14 Laurent Cassegrain

Quase todos os telescópios profissionais atuais são refletores, porém com sistema óptico publicado em 25 de abril de 1672 no “Journal des Sçavans” por Laurent G. Cassegrain, padre católico e professor de ciências francês.

Basicamente, o telescópio cassegrainiano se distingue do Gregoriano por ter espelho secundário convexo colocado antes do ponto de foco do espelho primário; enquanto o Gregoriano tem espelho secundário côncavo, colocado após o ponto de foco do espelho primário. No telescópio cassegrainiano o espelho primário deve ser parabólico côncavo e o espelho secundário hiperbólico convexo.

15 Desenvolvimento Óptico

O problema da aberração esférica começou a ser efetivamente resolvido no início do século XVIII, com o desenvolvimento de tecnologias para a fabricação de espelhos com outras formas que não fossem plana ou esférica.

O primeiro telescópio com aberração esférica “praticamente zero” foi fabricado em 1723 pelo

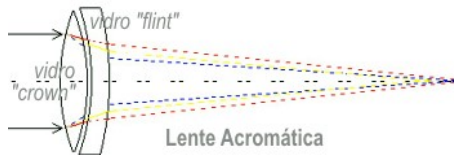


Figura 7: Esboço: Lente acromática.

escocês James Short. Foi um telescópio Newtoniano com espelho parabólico feito de “speculum”.

Durante a sua vida Short fabricou mais de mil telescópios newtonianos e gregorianos; todos com espelhos dessa liga metálica.

O primeiro telescópio refrator “acromático” foi construído em 1736 por Chester Moor Hall (advogado e matemático inglês). Hall percebeu que vidros com composições diferentes não apenas desviavam por ângulos diferentes os feixes de luz que passavam por eles, como também variavam o ângulo de desvio, de cor para cor, de forma diferente. Assim, seria possível construir uma objetiva que não apresentasse aberração cromática, combinando duas lentes feitas de materiais diferentes.

Dentre os materiais disponíveis, Hall determinou o par que melhor prestava aos seus objetivos (vidros “crown” e “flint”) e calculou as formas exatas que cada lente deveria ter (a de vidro “crown” seria biconvexa e a de vidro “flint” seria côncava-convexa).

Para não dar pistas antecipadas do invento em que trabalhava, Hall encomendou cada uma das lentes de sua objetiva a uma firma diferente. Entretanto as duas firmas contratadas por Hall contrataram o mesmo óptico para fazer o serviço. George Bass, foi o óptico que construiu a primeira objetiva acromática, com 6,5 centímetros de diâmetro e distância focal de 50 centímetros. Quase que simultaneamente George Bass recebeu as encomendas das duas lentes (de mesmo diâmetro e curvaturas). Isso não poderia ser coincidência. Bass não demorou a “matar a charada” e antes mesmo de concluir seu trabalho já divulgava a

ideia da objetiva acromática em um grande círculo de relacionamento.

As objetivas com dois elementos podem reduzir muito o cromatismo das lentes. Com o objetivo de reduzir ainda mais a aberração cromática têm sido construídas objetivas com três elementos, denominadas “apocromáticas”.

Atualmente os espelhos dos telescópios são construídos, a partir de blocos de vidro. Por polimento, dá-se a forma desejada a uma das faces do bloco de vidro e aplica-se sobre essa face (em uma câmara de vácuo) uma fina camada de alumínio. O alumínio refletirá a luz; o vidro apenas dá a forma desejada a essa camada de alumínio.

Os telescópios refletores além de não apresentarem aberração cromática, são mais fáceis de serem fabricados que os refratores. Para fazer um espelho você tem que polir apenas uma face do bloco de vidro; para fazer uma lente você tem que polir duas faces. Além disso, para fazer o espelho o vidro não precisa ser de primeiríssima qualidade, pois a luz não passará por dentro do vidro, ela apenas interagirá com a camada de alumínio depositada sobre uma de suas superfícies.

Sobre o autor

Renato Las Casas (renato@fisica.ufmg.br) é professor do Departamento de Física da UFMG, instituição onde se graduou em 1977 e se tornou mestre em 1980, com uma dissertação sobre astrofísica do meio interestelar. Nos últimos 30 anos, como coordenador do grupo de astronomia da UFMG (*Observatório Astronômico Frei Rosário*), tem se dedicado ao ensino e divulgação da astronomia em particular e de ciências em geral. Em outubro de 2008 recebeu do governo do estado de Minas Gerais o prêmio *Prof. Francisco de Assis Magalhães Gomes*, por seu trabalho de popularização da ciência. Desde 2010 produz e apresenta o programa de divulgação científica “Universo Fantástico” na Radio Inconfidência.

A quem pertence a Lua?

Alice Lopes Fabris

École Normale Supérieure, Paris-Saclay, França

Resumo

O presente artigo visa estudar como o direito internacional regula as atividades no espaço cósmico, na Lua e em outros corpos celestes. Também será comentado questões sobre o regime de propriedade aplicado no espaço cósmico, sua evolução e seu emprego hoje em dia.

Abstract

This article aims to study how the activities in outer space, the Moon, and other celestial bodies are governed by International Law. It will also highlight questions about the regime of property rights applied in outer space, its evolution and its uses nowadays.

Palavras-chave: direito internacional, direito espacial, espaço cósmico, Lua, corpos celestes.

Keywords: international law, space law, outer space, Moon, celestial bodies.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.30676](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.30676)

1 Introdução

No dia 20 de julho de 1969, o primeiro homem pisou na Lua [1]. Durante esta expedição, os tripulantes do Apolo 11 fincaram seis bandeiras dos Estados Unidos da América em solo lunar. No entanto, o fato da tripulação estadunidense ser a primeira a chegar no corpo celeste e deixar a bandeira de seu país em solo lunar, torna os Estados Unidos o proprietário da Lua? Convém notar que esta expedição foi uma, mas não a primeira, etapa histórica na corrida espacial entre os Estados Unidos e a União Soviética. Em 4 de outubro de 1957, o primeiro satélite espacial foi posto em órbita pelos soviéticos [1]. Devido às rápidas conquistas espaciais, a preocupação de um uso militar deste espaço ainda não conquistado tomou os corredores da das Nações Unidas (ONU) e entrou na pauta na Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU), principal órgão deliberativo da Organização das Nações Unidas. Convém notar que a ONU tem como um de seus propósitos [2]:

Manter a paz e a segurança internacionais e, para esse fim: tomar, coletivamente, medidas efetivas para evitar ameaças à paz e reprimir os atos de agressão ou outra qualquer ruptura da paz e chegar, por meios pacíficos e em conformidade com os princípios da justiça e do direito internacio-

nal, a um ajuste ou solução das controvérsias ou situações que possam levar a uma perturbação da paz.

E é com base neste propósito que a Assembleia Geral adota sua primeira resolução sobre o tema: a Resolução nº 1348 de 13 de dezembro de 1958. Nesta resolução a Assembleia reconhece que o espaço ultraterrestre é de interesse comum da humanidade, sendo um dos objetivos que a humanidade deseja, e que governe o uso do espaço cósmico e dos corpos celeste, é que o uso desse espaço seja pacífico. Nesse sentido, é proferido pela declaração que “o interesse comum da humanidade no espaço cósmico e o objetivo comum para o uso do mesmo é que ele seja realizado somente para fins pacíficos”.¹ Além disso, os Estados, por meio desta resolução, expressaram seu desejo de estimular a exploração deste novo território “em benefício da humanidade”. Salienta-se a questão sobre o uso do espaço como “o interesse comum da humanidade no espaço exterior e o objetivo comum de uso desse espaço unicamente para fins pacíficos” [3].² Convém salientar que o interesse da humanidade no espaço é reafirmado nas resoluções posteriores [4–6].

¹Nossa tradução.

²Nossa tradução.

Mas o que seria *humanidade* para o direito internacional?

2 A humanidade e o direito internacional

A humanidade não é um conceito bem estabelecido em direito internacional, tendo até hoje, sua definição contestada. No entanto, pode-se entender a humanidade como o conjunto de seres humanos, independentemente da nacionalidade que eles possuem [7]. Segundo o professor René-Jean Dupuy, “seres humanos deste tempo possuem o sentimento de pertencimento duplo, à nação e à humanidade”, pois “eles participam de sistemas socioculturais que transpõem as fronteiras” [8].³ Hoje em dia, adiciona-se a definição de humanidade, o conceito de gerações futuras.

Mas quais seriam esses benefícios? A própria Resolução n° 1348, de 1958, nos dá uma pista ao mencionar que “os últimos progressos com respeito ao espaço ultraterrestre têm agregado uma nova dimensão à existência humana e aberto novas possibilidades para aumentar os conhecimentos do homem e melhorar sua existência”.⁴

3 Patrimônio comum da humanidade

A ideia de um território não possa pertencer a nenhum Estado e que deve ser utilizado somente com o objetivo de “aumentar os conhecimentos do homem e melhorar [nossa] existência” foi consagrado no Tratado da Antártica, primeiro instrumento vinculante a tratar do assunto. Em 1959, este tratado foi adotado no sistema ONU e tinha como objetivo “assegurar que a Antártida seja usada para fins pacíficos, para cooperação internacional na pesquisa científica, e não se torne cenário ou objeto de discórdia internacional” [9]. É a partir da adoção deste tratado que os princípios que hoje regem os patrimônios comuns da humanidade são positivados [10, 11].

O patrimônio comum da humanidade é definido como “espaços ou bens considerados como uma riqueza comum ao conjunto de gerações presentes e futuras reconhecidos com tais e geridos pela comunidade internacional com o objetivo de conservações e transmissão às gerações futuras” [7]. Além do caso específico da Antártida, territórios

reconhecidos como patrimônio comum da humanidade hoje são o leito do mar, os fundos marinhos e o seu subsolo além dos limites da jurisdição nacional, como afirma o artigo 136° da Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar.

A exclusão da possibilidade de se exercer a soberania no espaço cósmico já é desenhada em 1961, momento em que a Assembleia Geral adota uma nova resolução que estabelece princípios cardinais para o uso do espaço cósmico: “o espaço cósmico e corpos celestes não estão sujeitos à apropriação nacional” [12].

Estes princípios são reforçados em 13 de dezembro de 1963, com a adoção da *Declaração dos Princípios Jurídicos Reguladores das Atividades dos Estados na Exploração e Uso do Espaço Exterior*. Esta Declaração, que estabelece, entre outros, que [13]:

A exploração e o uso do espaço exterior serão realizados em benefício e no interesse de toda a humanidade; O espaço exterior e os corpos celestes não poderão ser objeto de apropriação nacional por proclamação de soberania, por uso ou ocupação, ou por qualquer outro meio.⁵

Todos os documentos supracitados, no entanto, não são obrigatórios para os Estados. As resoluções da Assembleia Geral das Nações Unidas possuem caráter recomendatório e assim não criam obrigações aos Estados [14].⁶ Mas em 1967, foi adotado o primeiro instrumento internacional compulsório do tema: o *Tratado sobre Princípios Reguladores das Atividades Espaciais dos Estados na Exploração e Uso do Espaço Cósmico, inclusive da Lua e demais Corpos Celestes* [15].⁷

Este tratado foi adotado em 27 de janeiro de 1967 com abertura para assinatura simultaneamente em Moscou, Washington e Londres entrando em vigor em 10 de outubro de 1967 [12]. Neste tratado é estabelecido um regime coletivo para usufruto do espaço cósmico, inclusive a Lua e demais corpos celestes, sendo proibida a “apropriação nacional por proclamação de soberania, por uso ou ocupação, nem por qualquer outro

⁵Nossa tradução.

⁶O caráter não vinculante das resoluções da AGNU também foi reiterada pela Corte Internacional de Justiça, especialmente em dois casos: *Opinião Consultiva sobre as Consequências Legais da Separação do Arquipélago de Chagos das Ilhas Maurício*, 1965, §152; *Opinião Consultiva sobre a Legalidade da Ameaça ou Uso de Armas Nucleares*, 1996, §12.

⁷A lista dos Estados que ratificaram e assinaram o instrumento está no Apêndice B.

³Nossa tradução.

⁴Nossa tradução.

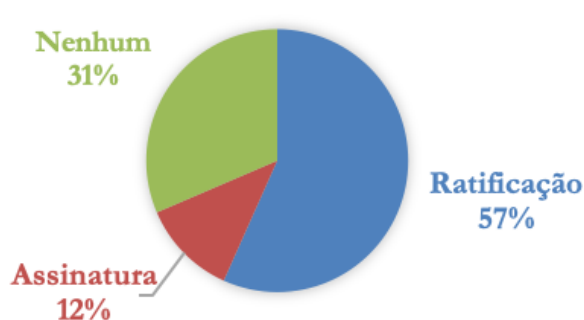


Figura 1: Percentagem dos Estados membros da ONU que ratificaram ou assinaram o Tratado sobre Princípios Reguladores das Atividades Espaciais dos Estados na Exploração e Uso do Espaço Cósmico, inclusive da Lua e demais Corpos Celestes. Devemos ressaltar a diferença dos efeitos das assinaturas e ratificações. A assinatura não obriga o Estado a cumprir todas as obrigações presentes no tratado, mas tão somente a obrigação de não frustrar o objeto e finalidade de um tratado antes de sua entrada em vigor (art.18 da Convenção de Viena de Direitos dos Tratados de 1969). O Estado está vinculado ao tratado depois da ratificação.

meio”.⁸ Além disso, o tratado declara que:

A exploração e o uso do espaço cósmico, inclusive da Lua e demais corpos celestes, só deverão ter em mira o bem e interesse de todos os países, qualquer que seja o estágio de seu desenvolvimento econômico e científica, e são incumbência de toda a humanidade.⁹

Esta última expressão é interpretada por alguns autores como o início da aplicação do regime de patrimônio comum da humanidade no espaço cósmico. Mas a aplicação do conceito de patrimônio comum da humanidade só seria reconhecida em 1979, com a adoção do *Acordo que Regula as Atividades dos Estados na Lua e em Outros Corpos Celestes*. Este acordo decreta que “a Lua e seus recursos naturais são patrimônio comum da humanidade” [16, 17].¹⁰ Contudo, devido a este artigo, o acordo possui uma baixa adesão.

Convém notar que, apesar do baixo número de Estados que ratificaram ou assinaram estes tratados, isto não significa que aqueles que não o fizeram não sejam proibidos de exercer sua soberania no espaço cósmico e corpos celestiais. No direito internacional, além dos tratados, convenções e acordos que criam obrigações para os Estados que o ratificam, os países podem estar vinculados a uma norma internacional devido a um

⁸Artigo 2º.

⁹Artigo primeiro.

¹⁰Artigo 11.

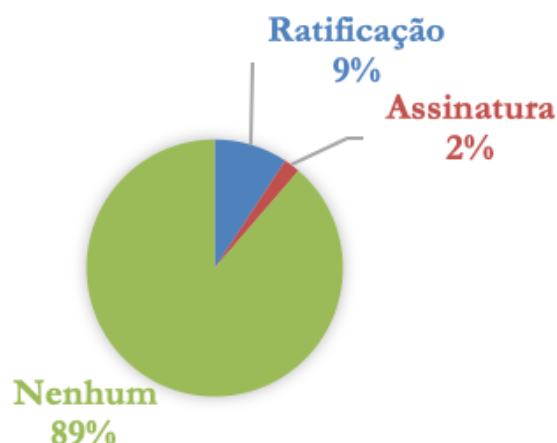


Figura 2: Percentagem dos Estados membros da ONU que ratificaram ou assinaram o Acordo que Regula as Atividades dos Estados na Lua e em Outros Corpos Celestes.

costume ou princípio geral de direito.

4 O princípio geral de direito

Um princípio geral de direito é definido de duas formas dependendo do autor: são princípios que regem o direito internacional ou são princípios de direito comuns aos Estados [18]. Contudo, neste caso, a fonte mais pertinente para estudar se a proibição de exercer a soberania no espaço cósmico e corpos celestes é uma norma internacional aplicável a todos os Estados implica em se interrogar se ela constitui um costume internacional.

5 O costume internacional

O costume internacional é definido pela Corte internacional de justiça como “prática geral aceita como sendo o direito”¹¹ e é composto por dois elementos: “o elemento objetivo, representado pela própria prática internacional, e o elemento subjetivo, a *opinio juris sive necessitatis*, isto é, a convicção de que tal prática é de direito e aceita como tal” [18]. Segundo o juiz brasileiro da Corte Internacional de Justiça, CIJ, Antônio Augusto Cançado Trindade:

Já se destacou como traço característico do direito internacional costumeiro sua formação não pela repetição de atos que visem necessária e expressamente a criação do direito internacional,

¹¹Artigo 38 do Estatuto da Corte Internacional de Justiça.

mas sim por uma apreciação baseada na observação criteriosa da conduta dos Estados no plano internacional [18].

Isto é, quando os Estados repetem uma prática, conjuntamente com uma convicção que ela reflete uma norma jurídica, esta prática, com o passar do tempo, pode se tornar um costume. Contudo, no que tange o direito espacial, a questão do tempo é analisada de outra maneira: a criação do costume nesta área foi mais imediata. O juiz Cançado Trindade ressalta o artigo do Professor Bin Cheng que sugere um direito costumeiro imediato, isto é:

À luz dos desenvolvimentos no direito espacial, sugeri por outro lado que o direito internacional consuetudinário tinha na realidade apenas um elemento constitutivo, a opinio juris, pois é a prática geral aceita como de direito que fornece evidência da regra costumeira e não vice-versa. Como no plano internacional os Estados são até certo ponto criadores das normas que regem o convívio internacional – argumentou o autor – tais normas devem ser tidas por obrigatórias ainda que venham existindo por período de tempo bastante curto; da opinio juris communis adviria assim o “direito internacional costumeiro imediato”, e as resoluções da Assembleia Geral da ONU, como a 1721 e a 1962 (tecnicamente não obrigatórias), desempenhariam a função de identificar a opinio juris latente dos Estados-membros da ONU e delinear a existência e conteúdo das novas normas costumeiras, contra as quais não poderiam os Estados-membros de boa-fé se investir.¹²

¹²Ver referência [18]. Ibid., p. 71. Sobre a adoção dessas resoluções o juiz Antônio Augusto Cançado Trindade ressalta que “As resoluções 1721(XVI), de 20 de dezembro de 1961, e 1962(XVIII), de 13 de dezembro de 1963, passaram a ser aclamadas como o ‘capítulo inicial’ do tratamento do direito espacial contemporâneo. Sabe-se hoje, porém, que o ‘acordo’ entre as duas superpotências – EUA e URSS – que possibilitou a adoção de tais resoluções não passou sem controvérsia: quanto à forma de tal ‘acordo’, enquanto a então União Soviética preferia um tratado, os Estados Unidos insistiam em uma resolução da Assembleia Geral, fórmula esta que a União Soviética foi finalmente persuadida a aceitar dado o procedimento complicado e politicamente incerto da conclusão de tratados de acordo com o direito constitucional norte-americano”, Ibid., p. 70. Convém também salientar as críticas tecidas pelo juiz: “A despeito de sua originalidade, tal construção veio a ser alvo de críticas. Segundo estas, resoluções da Assembleia Geral da ONU (como as supracitadas) não poderiam por se constituir-se em direito internacional costumeiro, pois, dado seu caráter recomendatório, não poderiam tornar-se obrigatórias aos Estados-membros da ONU. Assim, a expressão “direito costumeiro imediato” mostrar-se-ia con-

Nesse sentido, é considerado um princípio costumeiro¹³ que deve ser respeitado por todos os Estados que a Lua e outros corpos celestiais não podem ser apropriados. Segundo a *Max Planck Encyclopedia of Public International Law* existem duas exceções a este princípio: o uso de minerais e outras substâncias para fins científicos e a coleta e remoção de amostras de minerais e outras substâncias.¹⁴

6 A exploração

Apesar de não poder exercer a soberania sobre o espaço cósmico, a Lua e demais corpos celestes, esses podem ser explorados pelos Estados. Segundo o *Tratado sobre Princípios Reguladores das Atividades Espaciais dos Estados na Exploração e Uso do Espaço Cósmico, inclusive da Lua e demais Corpos Celestes* [15]:

O espaço cósmico, inclusive a Lua e demais corpos celestes, poderá ser explorado e utilizado livremente por todos os Estados sem qualquer discriminação em condições de igualdade e em conformidade com o direito internacional, devendo haver liberdade de acesso a todas as regiões dos corpos celestes.¹⁵

Convém notar que segundo Francis Lyall e Paul B. Larsen, “a exploração não significa a apropriação permanente de materiais *in situ*” e deve respeitar os interesses das gerações futuras, isto é a preservação do território para que as gerações futuras também possam usufruir [20]. Mas seria esta proibição de exploração no espaço cósmico, na Lua e nos demais corpos celestes estendida às empresas privadas, organizações e indivíduos?

Essa questão é ainda objeto de debate. Em 2015, os Estados Unidos adotou o *U.S. Commercial Space Launch Competitiveness Act* que autoriza cidadãos estadunidenses a recuperarem e

tradição, e melhor seria concentrar em outros meios para explicar a influência de tais resoluções da ONU do que ‘falsificar o costume’ para esse propósito”, Ibid., p. 72.

¹³Segundo a *Max Planck Encyclopedia of Public International Law*, “as regras fundamentais em que este regime se baseia - os princípios de não apropriação, não militarização e liberdade de exploração da Lua e outros organismos celestes - adquiriram amplo reconhecimento internacional como sendo adequadas para alcançar seus objetivos e são geralmente consideradas como constituindo disposições de direito internacional consuetudinário”. Ver Referência [19], § 23.

¹⁴Referência [19], Ibid. § 15.

¹⁵Artigo primeiro.

tornarem-se proprietários de recursos de asteroides, incluindo minerais preciosos. No entanto, segundo alguns autores esta autorização violaria a proibição de apropriação de bens do espaço cósmico e corpos celestes [21,22]. Isto porque a proibição seria estendida a todos, tendo em vista que a intenção do tratado era a proibição de todo uso que não beneficie a humanidade como um todo. Outros argumentam que o uso da palavra soberania limitaria a aplicação desta regra aos Estados. Não há ainda um consenso sobre a questão, mas a solução talvez esteja no regime de exploração dos fundos marinhos, que também são reconhecidos como patrimônio comum da humanidade.

7 E o regime de responsabilidade?

Finalmente, devemos ressaltar que, apesar do espaço cósmico e dos corpos celestes serem considerados patrimônio comum da humanidade, isto não significa que os Estados não têm responsabilidade sobre os acontecimentos neste espaço. A própria declaração de 1963 estabelecia que:

Cada Estado que efetue ou mande efetuar o lançamento de um objeto ao espaço exterior, e cada Estado, de cujo território ou base é efetuado o lançamento do objeto, é responsável internacionalmente pelos danos causados por tal objeto a outro Estado ou a suas pessoas físicas ou jurídicas, na Terra ou no espaço exterior.

Assim, regras devem também ser respeitadas no espaço. Segundo o *Tratado sobre Princípios Reguladores das Atividades Espaciais dos Estados na Exploração e Uso do Espaço Cósmico, inclusive da Lua e demais Corpos Celestes*:¹⁶

As atividades dos Estados Partes deste Tratado, relativas à exploração e uso do espaço cósmico, inclusive da Lua e demais corpos celestes, deverão efetuar-se em conformidade com o direito internacional, inclusive a Carta das Nações Unidas, com a finalidade de manter a paz e a segurança internacional e de favorecer a cooperação e a compreensão internacionais.¹⁷

Para detalhar essas regras de responsabilidade os Estados adotaram um novo tratado: a *Convenção sobre Responsabilidade Internacional por Danos Causados por Objetos Espaciais*. Esta Convenção possui duas regras principais: os danos

¹⁶A lista dos Estados que ratificaram e assinaram o instrumento está no Apêndice B

¹⁷Referência [15], artigo terceiro.

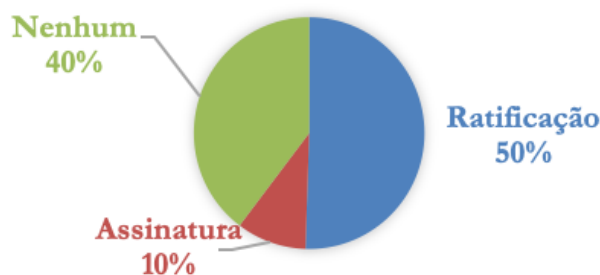


Figura 3: Percentagem dos Estados membros da ONU que ratificaram ou assinaram a Convenção sobre Responsabilidade Internacional por Danos Causados por Objetos Espaciais.

feitos em superfície terrestre¹⁸ e os danos sofridos no espaço cósmico.¹⁹ Contudo, os danos sofridos pelo próprio espaço cósmico ou corpos celestes não são codificados.

O regime jurídico da Lua, do espaço cósmico e dos demais corpos celestes é ainda incipiente. Contudo, é inegável que toda atividade conduzida neste território deve ser realizada respeitando os interesses da humanidade e das gerações futuras, isto é, as operações na Lua, no espaço cósmico e nos demais corpos celestes devem preservar o ambiente destes territórios e devem ter a finalidade de auxiliar o bem-estar da humanidade como um todo.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer Júlio C. Fabris pela leitura e comentários e ao avaliador anônimo pelas sugestões. Agradeço à CAPES pelo suporte financeiro através de bolsa doutorado no exterior.

Sobre a autora

Alice Lopes Fabris (alice.lfabris@gmail.com) é formada em direito pela UFMG e atualmente realiza o seu doutoramento em direito internacio-

¹⁸Segundo o art. 2 do Tratado, “um Estado lançador será responsável absoluto pelo pagamento de indenização por danos causados por seu objetos espaciais na superfície da Terra ou a aeronaves em voo”.

¹⁹Segundo o art. 3 do Tratado, “na eventualidade de danos causados em local fora da superfície da Terra a um objeto espacial de um Estado lançador ou a pessoa ou propriedades a bordo de tal objeto espacial por um objeto espacial de outro Estado lançador só terá esse último responsabilidade se o dano decorrer de culpa sua, ou de culpa de pessoas pelas quais seja responsável”.

nal pela *École Normale Supérieure (ENS)*, Paris/Saclay, França, estando ligada ao *Institut de Sciences sociales du Politique, UMR 722*. Sua tese versa sobre a noção de crime contra o patrimônio cultural em direito internacional.

Apêndice A: Material suplementar

Para consulta sobre as questões jurídicas referentes ao uso e apropriação do espaço cósmico e dos corpos celestes, há os seguintes tratados e convenções.

- *Acordo que Regula as Atividades dos Estados na Lua e em Outros Corpos Celestes*, adotado em Nova Iorque, 5 de dezembro de 1979, entrada em vigor em 11 de julho de 1984.
- *Carta das Nações Unidas*, adotado em São Francisco, 26 de junho de 1945, entrada em vigor em 24 de outubro de 1945.
- *Convenção de Viena sobre os Direitos dos Tratados*, adotado em Viena, 23 de maio de 1969, entrada em vigor em 27 de janeiro de 1980.
- *Convenção sobre Responsabilidade Internacional por Danos Causados por Objetos Espaciais*, adotado em Londres, Moscou e Nova Iorque, 29 de março de 1972, entrada em vigor 1º de setembro de 1972.
- *Estatuto da Corte Internacional de Justiça*, adotado em São Francisco, 26 de junho de 1945.
- *Tratado sobre Princípios Reguladores das Atividades Espaciais dos Estados na Exploração e Uso do Espaço Cósmico, inclusive da Lua e demais Corpos Celestes*, adotado em Londres, Moscou e Nova Iorque, 27 de janeiro de 1967, entrada em vigor 10 de outubro de 1967.

Apêndice B: Adesão dos países aos tratados sobre a Lua, Corpos Celestes e o Espaço Cósmico

A Tabela 1 mostra os Estados membros da ONU que ratificaram (R) ou assinaram (S) os tratados/acordo reguladores do espaço cósmico.

Tabela 1: Dados relativos às ratificações e assinaturas dos Estados membros da ONU. Estados que ratificaram o tratado/acordo estão indicados pela letra R. Assinaturas são indicadas pela letra S.

Estado	Tratado/Acordo		
	1967	1972	1979
Afeganistão	R		
África do Sul	R	R	
Albânia			
Alemanha	R	R	
Andorra			
Angola			
Antígua e Barbuda	R	R	
Arábia Saudita	R	R	R
Argélia	R	R	
Argentina	R	R	
Armênia	R	R	R
Austrália	R	R	R
Áustria	R	R	R
Azerbaijão	R		
Bahamas	R		
Bahrein	R	R	
Bangladesh	R		
Barbados	R		
Bélgica	R	R	R
Belize			
Benin	R	R	
Bielorrússia	R	R	
Bolívia	S		
Bósnia e Herzegovina		R	
Botswana	S	R	
Brasil	R	R	
Brunei			
Bulgária	R	R	
Burkina Faso	R		
Burundi	S		
Butão			
Cabo Verde			
Camarões	S		
Camboja		S	
Canadá	R	R	
Cazaquistão	R	R	R
Chade			
Chile	R	R	R
China	R	R	
Chipre	R	R	

Continua...

<i>Continuação da Tabela 1</i>			
Estado	Tratado/Acordo		
	1967	1972	1979
Colômbia	S	S	
Comores			
Coreia do Norte	R	R	
Coreia do Sul (República da Coreia)	R	R	
Costa do Marfim			
Costa Rica		S	
Croácia		R	
Cuba	R	R	
Dinamarca	R	R	
Djibouti			
Dominica			
Egito	R	R	
El Salvador	R	R	
Emirados Árabes Unidos	R	R	
Equador	R	R	
Eritreia			
Eslováquia	R	R	
Eslovênia	R	R	
Espanha	R	R	
Estados Federados da Micronésia			
Estados Unidos da América	R	R	
Estônia	R		
Etiópia	S		
Fiji	R	R	
Filipinas	S	S	R
Finlândia	R	R	
França	R	R	S
Gabão		R	
Gâmbia	S	S	
Gana	S	S	
Geórgia			
Granada			
Grécia	R	R	
Guatemala		S	S
Guiana	S		
Guiné			
Guiné Equatorial	R		
Guiné-Bissau	R		
Haiti	S	S	
Honduras	S		
Hungria	R	R	
Iêmen	R		
<i>Continua...</i>			

<i>Continuação da Tabela 1</i>			
Estado	Tratado/Acordo		
	1967	1972	1979
Ilhas Marshall			
Ilhas Salomão			
Índia	R	R	
Indonésia	R	R	S
Irã	S	R	
Iraque	R	R	
Irlanda	R	R	
Islândia	R	S	
Israel	R	R	
Itália	R	R	
Jamaica	R	N	
Japão	R	R	
Jordânia	S	S	
Kiribati			
Kuwait	R	R	R
Laos	R	R	
Lesoto	S		
Letônia			
Líbano	R	R	R
Libéria			
Líbia	R	R	
Liechtenstein		R	
Lituânia	R	R	
Luxemburgo	R	R	
Macedônia do Norte			
Madagáscar	R		
Malásia	S		
Malawi			
Maldivas			
Mali	R	R	
Malta	R	R	
Marrocos	R	R	R
Maurícia	R		
Mauritânia			
México	R	R	R
Mianmar	R		
Moçambique			
Moldávia			
Mónaco			
Mongólia	R	R	
Montenegro			
Namíbia			
Nauru			
Nepal	R	S	
Nicarágua	R	R	
Níger	R	R	
Nigéria	R	R	
<i>Continua...</i>			

<i>Continuação da Tabela 1</i>			
Estado	Tratado/Acordo		
	1967	1972	1979
Noruega	R	R	
Nova Zelândia	R	R	
Omã		S	
Países Baixos	R	R	R
Palau			
Panamá	S	R	
Papua-Nova Guiné	R	R	
Paquistão	R	R	R
Paraguai	R		
Peru	R	R	R
Polônia	R	R	
Portugal	R	R	
Quênia	R	R	
Quirguistão			
Reino Unido	R	R	
República Centro-Africana	S	S	
República Democrática do Congo	S	S	
República do Congo			
República Dominicana	R	R	
República Tcheca	R	R	
Romênia	R	R	S
Ruanda	S	S	
Rússia	R	R	
Samoa	N		
San Marino	R		
Santa Lúcia			
São Cristóvão e Névis			
São Tomé e Príncipe			
São Vicente e Granadinas	R	R	
Seicheles	R	R	
Senegal		R	
Serra Leoa	R	S	
Sérvia		R	
Singapura	R	R	
Síria	R	R	
Somália	S		
Sri Lanka	R	R	
Sudão			
Sudão do Sul			
Suécia	R	R	
Suíça	R	R	
Suriname			
<i>Continua...</i>			

<i>Continuação da Tabela 1</i>			
Estado	Tratado/Acordo		
	1967	1972	1979
Tailândia	R		
Tajiquistão			
Tanzânia		R	
Timor-Leste			
Togo	R	R	
Tonga	R		
Trinidad e Tobago	S	R	
Tunísia	R	R	
Turquemenistão			
Turquia	R	R	R
Tuvalu			
Ucrânia	R	R	
Uganda	R		
Uruguai	R	R	R
Uzbequistão			
Vanuatu			
Venezuela	R	R	R
Vietnã	R		
Zâmbia	R	R	
Zimbabwe			
Palestina			
Qatar	R	R	
Suazilândia	R	R	

Referências

- [1] H. Curien, *Conquête de l'espace*, Encyclopædia Universalis, disponível em www.universalis-edu.com/encyclopedie/conquete-de-l-espace/ (acesso em 26 mai. 2020).
- [2] ONU, *Carta das Nações Unidas*, art.1, §1 (1945).
- [3] Assembleia Geral da ONU, resolução 1348, *Question of the Peaceful Use of Outer Space*, A/RES/1348(XIII) (13 de dezembro de 1958), disponível em [undocs.org/en/A/RES/1348\(XIII\)](http://undocs.org/en/A/RES/1348(XIII)) (acesso em 20 mai. 2020).
- [4] Assembleia Geral da ONU, resolução 1472, *International Cooperation in the Peaceful Uses of Outer Space*, A/RES/1472(XIV) (12 de dezembro de 1959), disponível em www.unoosa.org/oosa/oaadoc/data/resolutions/1959/general_assembly_14th_session/res_1472_xiv.html (acesso em 20 mai. 2020).

- [5] Assembleia Geral da ONU, resolução 1721, *International co-operation in the peaceful uses of outer space*, A/RES/1721(XVI) (20 de dezembro de 1961), disponível em www.unoosa.org/oosa/ootadoc/data/resolutions/1961/general_assembly_16th_session/res_1721_xvi.html (acesso em 20 mai. 2020).
- [6] Assembleia Geral da ONU, resolução 1802, *International co-operation in the peaceful uses of outer space*, A/RES/1802(XVII) (14 de dezembro de 1962), disponível em www.unoosa.org/oosa/ootadoc/data/resolutions/1962/general_assembly_17th_session/res_1802_xvii.html (acesso em 20 mai. 2020).
- [7] J. Salmon, *Dictionnaire international public* (Bruylant, Bruxelas, 2001).
- [8] R.J. Dupuy, *Dialectiques du droit international: souveraineté des États, communauté internationale et droits de l'humanité* (Pédone, Paris, 1999).
- [9] Brasil, Ministério do Meio Ambiente, *Antártida - Tratado da Antártida*, disponível em www.mma.gov.br/ acessibilidade/item/878-tratado-da-antartida (acesso em 21 mai. 2020).
- [10] A.C. Kiss, *La notion de patrimoine commun de l'humanité*, in *Collected Courses of the Hague Academy of International Law* (Nijhoff, Leiden, 1982), v. 175.
- [11] Z. Keyuan, *The Common Heritage of Mankind and the Antarctic Treaty System*, *Netherlands International Law Review*, **38**, 173 (1991).
- [12] B. Cheng, *Studies in International Space Law* (Oxford University Press, Oxford, 1997).
- [13] Assembleia Geral da ONU, resolução 1962, *International co-operation in the peaceful uses of outer space*, A/RES/1962(XVIII) (13 de dezembro de 1963), disponível em www.unoosa.org/oosa/ootadoc/data/resolutions/1963/general_assembly_18th_session/res_1962_xviii.html (acesso em 20 mai. 2020).
- [14] ONU, *Carta das Nações Unidas*, art.10 (1945).
- [15] Assembleia Geral da ONU, resolução 2222, *Treaty on Principles Governing the Activities of States in the Exploration and Use of Outer Space, including the Moon and Other Celestial Bodies*, RES/2222(XXI) (19 de dezembro de 1966), disponível em www.unoosa.org/oosa/ootadoc/data/resolutions/1966/general_assembly_21st_session/res_2222_xxi.html (acesso em 17 jun. 2020).
- [16] V. Pop, *Who Owns the Moon?: Extraterrestrial Aspects of Land and Mineral* (Springer, Heidelberg, 2008).
- [17] R. Lee, *Law and Regulation of Commercial Mining of Minerals in Outer Space* (Springer, Heidelberg, 2012).
- [18] A.A.C. Trindade, *Princípios do direito internacional contemporâneo* (FUNAG, Brasília, 2017).
- [19] M. Hofmann, *Moon and Celestial Bodies*, in *Max Planck Encyclopedia of Public International Law*, editado por R. Wolfrum (2010).
- [20] F. Lyall e P.B. Larsen, *Space Law* (Routledge, Londres, 2009).
- [21] J. Rathz, *Law Provides New Regulatory Framework for Space Commerce*, *Space Law*, 31 de dezembro de 2015, disponível em www.theregreview.org/2015/12/31/rathz-space-commerce-regulation (acesso em 24 mai. 2020).
- [22] M. Wall, *New Space Mining Legislation Is 'History in the Making'*, *Space Law*, 20 de dezembro de 2015, disponível em bit.ly/2N3sgkm (acesso em 24 mai. 2020).

Movimento de uma partícula interplanetária na atmosfera terrestre

José A. de Freitas Pacheco

Observatoire de la Côte d'Azur, Nice, França

Resumo

Neste artigo é descrita a evolução da trajetória de um meteoróide na atmosfera terrestre, em particular do evento observado casualmente no sul da França na noite do 02 de maio de 2016, que produziu dois clarões de magnitude $V \sim 8.0$ (invisíveis a olho nu). A modelagem da curva de luz observada sugere que o meteoróide entrou na atmosfera com um ângulo de aproximadamente 80° em relação à vertical e com uma velocidade da ordem de 35 km/s . Os dois clarões podem ser explicados por uma partícula constituída internamente por óxidos do tipo FeO e/ou MgO , coberto por um material silicatado. A dimensão do meteoróide deveria ser da ordem de $0,3 - 0,7 \text{ mm}$ e sua desintegração ocorreu em altitudes de $80 - 90 \text{ km}$ acima da superfície terrestre.

Abstract

This article describes the evolution of the trajectory of a meteoroid in the Earth's atmosphere, in particular of the event observed serendipitously in the south of France on the night of May 2, 2016, which produced two flashes of magnitude $V \sim 8.0$ (invisible to naked eye). Modeling the observed light curve suggests that the meteoroid entered into the atmosphere at an angle of approximately 80° in relation to the vertical and with a speed of the order of 35 km/s . The two flashes can be explained by a particle constituted internally by oxides of the type FeO and/or MgO , covered by a silicate material. The size of the meteoroid should be on the order of $0.3 - 0.7 \text{ mm}$ and its disintegration occurred at altitudes of $80 - 90 \text{ km}$ above the earth's surface.

Palavras-chave: partículas, atmosfera da Terra, astrofísica.

Keywords: particles, Earth atmosphere, astrophysics.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31679](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31679)

1 Introdução

Fenômenos e objetos astronômicos constituem uma ferramenta ideal para o aprendizado de diversos campos da Física. Neste artigo este aspecto é ilustrado pelo estudo de um evento caracterizado pela penetração de uma partícula interplanetária (daqui por diante denominada simplesmente PIP) na atmosfera terrestre ou seja, um meteoro. Veremos que o estudo deste fenômeno requer um conhecimento do mecanismo de fricção, das leis de mudança de estado da matéria e da radiação por um corpo negro.

Vejam inicialmente o que são as PIPs. A Terra captura de forma quase contínua tais partículas, com uma taxa da ordem de $3 \times 10^7 \text{ kg/ano}$. A distribuição de massa das PIPs tem um pico para um valor da ordem de $10 \mu\text{g}$, correspondendo a uma dimensão da ordem de $100 \mu\text{m}$. A compo-

sição química destas partículas é dominada por minerais anídricos como a olivina e o piroxênio ou por minerais hídricos como os silicatos. As PIPs originam-se provavelmente nas colisões entre asteroides ou na sublimação de cometas ao se aproximarem do Sol. Restos cometários produzidos nos últimos séculos deram origem a diferentes chuvas de meteoros como as Leônidas, as Perseidas ou as Táuridas. O estudo das PIPs representa uma oportunidade única para o conhecimento do material primitivo que originou os planetesimais presentes no início da evolução do sistema solar.

A desintegração de uma PIP durante sua trajetória através da atmosfera é descrita seja por um processo de ablação seja por um processo de fragmentação catastrófico. No primeiro caso, como a velocidade de entrada na atmosfera varia entre $11 - 70 \text{ km/s}$, colisões com as moléculas do

ar produzem um aumento da temperatura suficiente para sublimar completamente a partícula, caso sua dimensão seja superior a $30\mu m$. A dimensão precisa depende das propriedades térmicas do material que constitui a PIP. A temperatura máxima atingida durante o processo de ablação depende de vários fatores: a velocidade e o ângulo de entrada na atmosfera com relação a vertical, a dimensão e as propriedades térmicas. Partículas com dimensões inferiores ao valor crítico sofrem uma desaceleração muito rápida e não sofrem um desgaste importante. As PIPs maiores fragmentam-se na Termosfera, em altitudes da ordem de 80-90 km, quando a “ram pressure” (pressão exercida pelo fluido no qual a partícula se move) exerce uma tensão da ordem de 10^5 dyn/cm^2 [1, 2].

A observação de meteoroides consiste essencialmente na medida da radiação emitida em função da altura acima da superfície terrestre. Esta “curva de luz” fornece informações sobre a estrutura física e sobre a composição química da PIP. Modelos de fragmentação, em geral, são capazes de reproduzir um grande número de eventos observados [3, 4]. Nestes modelos o meteoróide é suposto ser constituído por pequenas partículas aglutinadas através de um material volátil, que logo se vaporiza no processo de aquecimento. Desta forma, as demais partículas são liberadas e vaporizadas individualmente. A natureza do material volátil não é bem conhecida mas poderia ser um metal leve como, por exemplo, o sódio.

Neste artigo, a natureza de um meteoróide detectado casualmente na noite do 02 de Maio de 2016 é discutida. O evento foi observado durante o imageamento do aglomerado estelar NGC 2281. O interesse em modelizar tal evento refere-se ao fato que duas erupções luminosas podem ser observadas na imagem, separadas angularmente por $1^\circ 09'$. A primeira erupção pode ser vista próxima do bordo superior da imagem enquanto que a segunda ocorreu nas vizinhanças do aglomerado estelar. A trajetória luminosa entre as erupções é extremamente fraca (mas detectável) e a intensidade das erupções está abaixo do limite visual. Estes clarões são provavelmente devidos a evaporação súbita de materiais distintos que constituem a partícula, que possuem temperaturas diferentes de fusão e vaporização. Neste artigo será discutida a modelização deste evento particular, permitindo uma estimativa da altura na atmos-

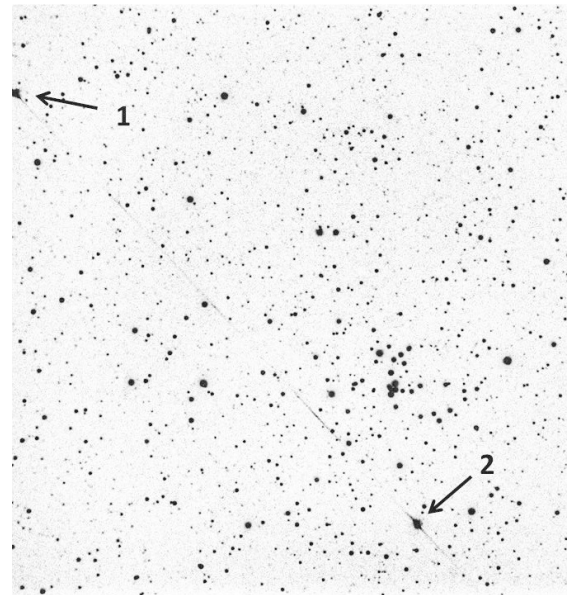


Figura 1: Imagem (negativa) do aglomerado estelar NGC 2281 (localizado pouco abaixo do centro da imagem à direita), na qual distingue-se a trajetória do meteoróide e as duas erupções: a primeira, no bordo superior à esquerda, indicada pelo $n^\circ 1$ e a segunda, abaixo do aglomerado, indicada pelo $n^\circ 2$

fera onde o mesmo ocorreu bem como das dimensões da PIP e da sua eventual composição química. Na seção 2, uma breve descrição do evento será dada, na seção 3 o modelo de ablação será discutido, na seção 4 os principais resultados serão apresentados e, finalmente, na seção 5 as conclusões serão discutidas.

2 O evento

Na noite do 02 de Maio de 2016, durante o imageamento do aglomerado estelar NGC 2281, o traço de um meteoróide foi detectado em uma das imagens tomada com um tempo de exposição de 120 s. As observações estavam sendo realizadas com um refrator de 150 mm e de abertura F/5, equipado com uma câmara digital. O evento não é comum pois duas erupções separadas por uma distância angular de $69'$ aparecem claramente na imagem (ver Figura 1). A primeira, indicada pelo $n^\circ 1$ localizada no bordo superior esquerdo e a segunda (indicada pelo $n^\circ 2$), logo abaixo do aglomerado mencionado. Como a totalidade da trajetória não está incluída na imagem, a ocorrência de outras erupções não pode ser excluída mas o clarão $n^\circ 2$ representa provavelmente a desintegração final da PIP. A emissão entre os clarões é muito

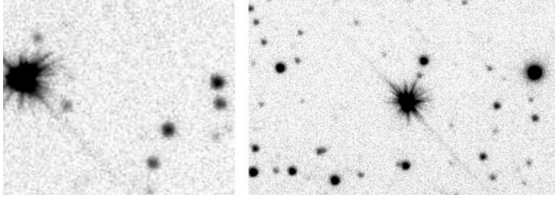


Figura 2: Zoom centrado nos dois eventos: o primeiro é mostrado na imagem do lado esquerdo enquanto que o segundo é mostrado na imagem do lado direito. Notar a presença de filamentos que caracterizam a natureza eruptiva dos eventos.

fraca mas pode ser vista na imagem. Na Figura 2 um “zoom” de ambos os eventos é mostrado.

Usando-se estrelas do aglomerado estelar com medidas fotométricas, pode-se calibrar a magnitude instrumental e, neste caso, a energia liberada em cada evento pode ser estimada. Ambas erupções tiveram a mesma magnitude, ou seja $V \sim 8.04$, confirmando a afirmação anterior de que os eventos ocorreram abaixo do limite de detecção visual. O fluxo de energia f pode ser calculado a partir da relação

$$V = -2.5 \log f - 11.49. \quad (1)$$

Desta equação, usando-se a magnitude observada obtemos um fluxo $f = 1.54 \times 10^{-8} \text{ erg.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Este valor não deve ser interpretado como o valor da emissão máxima mas sim como um valor médio da energia liberada durante a fase final do evento, como veremos adiante. O valor obtido para o fluxo pode estar ligeiramente subestimado uma vez que as imagens dos clarões estão próximas do limite de saturação do detector.

3 O modelo de ablação térmica

A descrição da emissão luminosa durante a trajetória do meteoróide na atmosfera requer modelos complexos envolvendo multipartículas oriundas da desintegração da PIP. No entanto, neste artigo nos restringiremos a um modelo incluindo uma única partícula que, como veremos, descreve muito bem o evento do 02/05/2016, permitindo estimar a dimensão da PIP e sua trajetória.

Desde o estudo pioneiro de Opik [5], o movimento de meteoróides na atmosfera tem sido objeto de estudos de inúmeros autores tais como os das Ref. [6, 7] ou da Ref. [8]. No contexto de um modelo envolvendo uma única partícula, o meteoróide é suposto ter uma simetria esférica e

uma estrutura homogênea. Se a interação com a atmosfera ocorre no regime de escoamento livre, isto é, o livre caminho médio das moléculas do ar é superior as dimensões da PIP, uma frente de choque não se desenvolverá. Para altitudes da ordem de 85 km esta condição é satisfeita para PIPs com dimensões inferiores a 1 cm . Desta forma, no regime de escoamento livre, a taxa de variação da quantidade de movimento é dada por

$$M \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} \Gamma \pi a^2 \rho_{at} V^2. \quad (2)$$

Na equação acima M é a massa da partícula, a o seu raio, V sua velocidade e ρ_{at} é a densidade local atmosférica. Γ é um coeficiente que mede a eficiência da resistência do ar (“drag force”) que, de acordo com [9] se situa no intervalo $0,5 \leq \Gamma \leq 1,0$. Os efeitos da gravidade e da impulsão de Arquimedes podem ser desprezados.

A segunda equação fixa o balanço térmico que descreve a evolução da temperatura do meteoróide. A transferência de calor através da partícula é desprezada e sua temperatura é suposta uniforme. Nestas condições, o balanço térmico é dado por

$$c_p M \frac{dT}{dt} = \frac{1}{2} \gamma_h a^2 \rho_{at} V^3 - 4\pi a^2 (T^{-4} - T_a^4) - L_e \frac{dM}{dt}. \quad (3)$$

A interpretação dos diferentes termos da equação (3) é a seguinte: o termo do lado esquerdo representa a variação da energia interna; o primeiro termo do lado direito representa a taxa na qual a partícula ganha energia térmica devido a fricção com o ar; o segundo e o terceiro termos representam respectivamente as taxas de perda de energia por radiação e por evaporação do material que constitui a PIP. A partícula é suposta radiar como um corpo negro com uma temperatura instantânea T em um meio com uma temperatura T_a . Os demais símbolos aparecendo na Eq. (3) são respectivamente: c_p , calor específico do material da PIP, γ_h , eficiência do processo de aquecimento por fricção e L_e , o calor latente de vaporização do material. A taxa de vaporização foi calculada pela equação de Knudsen-Langmuir, que descreve o processo de vaporização em condições de equilíbrio, isto é,

$$\frac{dM}{dt} = 4\pi a^2 \alpha_s P_V \sqrt{\frac{\mu}{2\pi kT}}. \quad (4)$$

Na equação acima α_s é o chamado coeficiente de colagem (“sticking factor”), P_V é a pressão de saturação do vapor da substância, que é uma função da temperatura e μ é o peso molecular do material da partícula.

O processo de erosão térmica torna-se importante uma vez alcançado o ponto de fusão da substância (ou substâncias) que constitui as PIPs. No entanto, mesmo em temperaturas inferiores, as colisões com moléculas da atmosfera podem produzir ejeção de átomos da superfície (“sputtering”) do meteoróide [10,11]. No entanto, o processo de “sputtering” não será aqui considerado porque a erosão térmica é de longe o mecanismo dominante de perda de massa.

O movimento e a erosão térmica da PIP ao longo de sua trajetória são descritos pelas Eq. (2-4), que devem ser resolvidas numericamente. Por conveniência, é preferível substituir a massa pelo raio da partícula através da relação $M = 4\pi\rho_m a^3/3$ e, ao invés do tempo, estudar a evolução do movimento em função da altitude z acima da superfície terrestre, ou seja

$$\frac{d}{dt} = -V \cos \lambda \frac{d}{dz}, \quad (5)$$

onde ρ_m é a densidade do meteoróide e λ é o ângulo de entrada na atmosfera em relação à vertical. Nestas condições, a equação de movimento fica sendo,

$$\frac{dV}{dz} = \frac{3}{8} \Gamma \left(\frac{\rho_{at}}{\rho_m} \right) \frac{V}{a \cos \lambda}, \quad (6)$$

enquanto que o balanceamento energético pode ser reescrito como,

$$\frac{dT}{dz} = \frac{3}{8} \left(\frac{\gamma_h}{c_p} \right) \left(\frac{\rho_{at}}{\rho_m} \right) \frac{V^3}{a \cos \lambda} + \frac{3\sigma(T^4 - T_{at}^4)}{\rho_m c_p V a \cos \lambda} - \frac{3L_e}{c_p} \frac{d \log a}{dz}. \quad (7)$$

Quando a temperatura atinge o valor do ponto de fusão, ela permanece constante até a evaporação completa da substância considerada. Do ponto de vista matemático, isto é obtido multiplicando-se o lado direito da Eq. (7) pela função de Heaviside $\Theta(T - T_m)$. Em outras palavras, quando $T \geq T_m$ a variação da temperatura dada pela Eq. (7) é nula. Finalmente, a equação descrevendo a variação do raio (equivalente a perda de massa da PIP) pode ser escrita como,

$$\frac{da}{dz} = \frac{\alpha_s P_V}{\rho_m V \cos \lambda} \sqrt{\frac{\mu}{2\pi kT}} \Theta(T - T_m). \quad (8)$$

Analogamente, a função de Heaviside foi introduzida de forma ad hoc no lado direito da Eq. (8) para impor que o processo de evaporação comece somente após que a temperatura de fusão seja alcançada.

4 Solução numérica das equações

A solução numérica das Eq. (6-8) necessita de um modelo de atmosfera. Neste trabalho foi utilizado o modelo MSIS-E 90 [12] que fornece uma tabela de valores da densidade do ar em função da altura, que foram interpolados durante o processo de cálculo.

Os demais parâmetros físicos necessários dependem da composição química adotada para a PIP. Inicialmente, apenas modelos com uma única substância foram calculados. Os minerais básicos que constituem os meteoritos rochosos são, em geral, óxidos como FeO , SiO e MgO que, em média, representam respectivamente 36%, 34% e 24% da massa de tais objetos [13]. Os parâmetros dos modelos constituídos por tais óxidos e pela olivina de magnésio são listados na Tabela 1.

Os parâmetros termodinâmicos tais como as temperaturas de fusão e ebulição ou o calor latente de evaporação são ainda bastante incertos para os materiais listados na Tabela 1 e os valores encontrados na literatura podem diferir significativamente. Os valores adotados e listados acima foram tomados das Ref. [14-16].

Para o cálculo da taxa de evaporação e a consequente variação do raio do meteoróide devida ao processo de ablação térmica, outros parâmetros físicos são necessários tais como o fator de colagem e a pressão de saturação do vapor. Os fatores de colagem adotados foram obtidos do trabalho de Fedkin e colaboradores [17] e estão listados na Tabela 2. A pressão de saturação do vapor foi calculada a partir da equação de Clausius-Clapeyron, isto é,

$$P_V = P_0 \exp \left\{ \mu L_e \left(\frac{1}{kT_e} - \frac{1}{kT} \right) \right\}, \quad (9)$$

onde P_0 é a pressão (em geral, o valor atmosférico) onde a temperatura de ebulição T_e é medida. Tomando-se o logaritmo decimal de ambos os lados da Eq. 9 resulta

$$\log P_V = A - \frac{B}{T}. \quad (10)$$

Tabela 1: A primeira coluna identifica a substância que caracteriza a PIP, as duas colunas seguintes indicam respectivamente as temperaturas de fusão e ebulição, a quarta coluna indica o calor latente de vaporização enquanto as duas últimas indicam respectivamente o calor específico e a densidade.

Substância	T -fusão (K)	T -ebulição (K)	$L_e(kJ/kg.K)$	$C_P(kJ/kg.K)$	$\rho_m(g/cm^3)$
SiO_2	1996	3200	12370	1,33	2,6
FeO	1650	3687	6090	0,91	5,7
MgO	3125	3870	8760	1,39	3,6
$Mg - olivina$	1890	2960	6050	1,11	3,0

Os coeficientes A e B estão dados na Tabela 2 e foram calculados a partir dos valores dos parâmetros listados na Tabela 1.

Tabela 2: A primeira coluna identifica a substância que caracteriza a PIP, a segunda apresenta o fator de colagem e as demais indicam respectivamente as constantes A e B (equação 10) quando a pressão é dada em dyn/cm^2 e a temperatura em Kelvin.

Substância	Fator de colagem	A	B
SiO_2	0,25	12,256	23045
FeO	0,20	13,600	24550
MgO	0,27	10,760	18416
$Mg - olivina$	0,20	21,474	45786

A rede de modelos calculada está caracterizada por uma dada composição química, o raio inicial da PIP, a velocidade e o ângulo de entrada na atmosfera. Em todos modelos, a altura inicial da entrada foi fixada em $200 km$ acima da superfície da Terra onde a temperatura ambiente é aproximadamente $200 K$. Igualmente, para todos modelos a eficiência da resistência do ar foi tomada como $\Gamma = 1$ enquanto que o valor adotado para a eficiência térmica foi $\gamma_h = 0.1$.

4.1 Resultados

Para cada modelo, a curva de luz foi calculada e o pico da emissão fixa a altura na qual ocorreu a erupção. Uma vez a altura h da erupção determinada, a distância D entre o observador e o evento pode ser calculada a partir da relação $D = h/\sin H$, onde H é a altitude, isto é o ângulo entre o eixo ótico do telescópio e o plano horizontal que, no presente caso vale $H = 31^\circ$. Uma vez obtida a distância, o fluxo teórico pode ser calculado e comparado com os valores observados.

A comparação entre os fluxos calculado e observado requer um certo cuidado uma vez que o

tempo de exposição da imagem é superior a duração da erupção. Na realidade, o que é medido é o valor médio do fluxo definido por,

$$\langle f \rangle = \frac{1}{4\pi D^2(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} l(t) dt. \quad (11)$$

onde $l(t)$ é a luminosidade teórica instantânea do meteoróide e a integração é feita em instantes imediatamente antes e depois do pico de luz. Na prática, como a luminosidade é calculada como uma função da altura, o fluxo médio é calculado como,

$$\langle f \rangle = \frac{\int_{h_1}^{h_2} l(z) \frac{dz}{V(z)}}{\int_{h_1}^{h_2} \frac{dz}{V(z)}}. \quad (12)$$

Para cada modelo, definido por uma dada substância, os parâmetros iniciais foram modificados até que o fluxo teórico reproduza o valor observado. Na realidade, a solução não é única e uma outra condição foi imposta para limitar o intervalo de incerteza na determinação dos parâmetros do meteoróide. Em outras palavras, a duração da erupção não deve ultrapassar $200 ms$. Com tal condição, modelos com velocidades iniciais da ordem de $35 km/s$ e com um ângulo de entrada de 80° produzem erupções de curta duração e cuja amplitude é controlada apenas pelo raio da PIP. As características de modelos capazes de reproduzir as observações são mostradas na Tabela 3.

Uma rápida inspeção da Tabela 3 mostra que o meteoróide associado ao evento tinha dimensões submilimétricas ou uma massa de apenas alguns miligramas. Para estas PIPs, a ablação térmica ocorre em alturas da ordem de $80 - 90 km$, valor típico encontrado por outros estudos para meteoróides de tais dimensões. Notar que, em média, a altura onde ocorre a ablação varia inversamente com a temperatura de ebulição. Em outras palavras, quanto maior a temperatura de ebulição

Tabela 3: A primeira coluna indica o mineral que constitui a PIP; a segunda e a terceira colunas listam respectivamente a altura acima da superfície e a distância ao observador nas quais ocorre a erupção, a quarta coluna indica o raio inicial do meteoróide e a última coluna indica a largura temporal à meia altura calculada do pulso luminoso.

Substância	$h_{max}(km)$	$D(km)$	$a(mm)$	$\Delta t_{1/2}(ms)$
SiO_2	88,6	171,9	0,54	12
$Mg - olivina$	88,3	167,5	0,72	172
FeO	84,2	163,4	0,43	115
MgO	79,1	153,5	0,31	36

mais próximo da superfície ocorre o pulso luminoso, como intuitivamente seria esperado. No caso atual dois pulsos luminosos são observados o que poderia sugerir que o meteoróide seria constituído por substâncias com diferentes temperaturas de ebulição. Voltaremos à discutir este aspecto mais adiante.

A Figura 3 mostra a variação da velocidade da partícula em função da altura para diferentes modelos. A fase de desaceleração mais importante ocorre quando o processo de evaporação se inicia. Isto é facilmente compreensível uma vez que a desaceleração é inversamente proporcional ao raio da partícula (ver Eq. 6). Assim, conforme o raio diminui devido ao processo de ablação a desaceleração aumenta de forma dramática.

A variação da temperatura do meteoróide ao longo de sua trajetória para os modelos considerados é mostrada na Figura 4. Como esperado, a temperatura aumenta a medida que o meteoróide penetra nas camadas mais densas da atmosfera até atingir a temperatura de fusão. Durante a mudança de fase a temperatura permanece constante e, ao mesmo tempo, inicia-se o processo de evaporação. O pico de emissão ocorre nesta fase e, logo após o máximo a partícula evapora-se completamente. Este processo pode ser visualizado na Figura 5 onde é mostrada a evolução do raio da partícula em função da altura acima da superfície da Terra.

Finalmente, na Figura 6, são mostradas as curvas de luz para os diferentes modelos. Deve-se notar que o pico da emissão em cada curva é superior ao valor do fluxo observado discutido anteriormente. Como já discutido, os fluxos mostrados na Figura 6 são valores instantâneos enquanto que o valor medido representa um valor médio devido ao fato que o tempo de exposição da imagem é bem superior a duração do pulso luminoso. A largura do pulso a meia amplitude de cada modelo está listada na última coluna da Tabela 3. O pulso mais curto resulta de PIPs constituídas

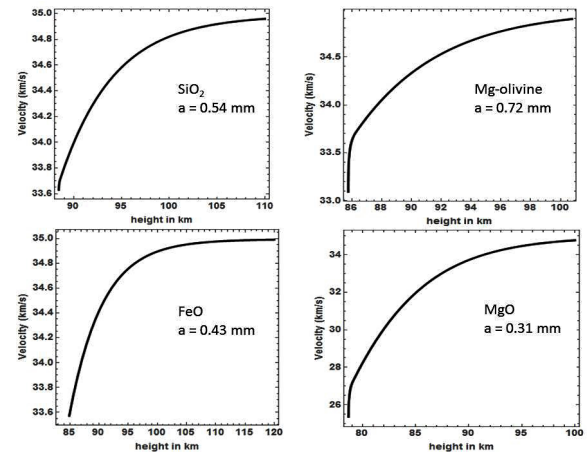


Figura 3: Variação da velocidade do meteoróide na atmosfera em função da altura para diferentes modelos. O raio inicial e o mineral que constitui estão indicados.

por SiO_2 enquanto que o mais longo é produzido por um meteoróide constituído de $Mg - olivina$.

A questão que se coloca agora é como o duplo pulso pode ser explicado? Uma resposta possível seria uma partícula constituída por uma mistura de dois minerais com temperaturas de fusão distintas. O primeiro pulso luminoso estaria associado ao mineral com a menor temperatura de fusão enquanto que o segundo, com o mineral que teria uma temperatura de fusão superior. Usando os resultados mostrados na Tabela 3, cinco modelos compostos possíveis foram construídos e suas propriedades são listadas na Tabela 4.

5 Conclusões

Um meteoróide foi detetado por acaso na noite de 02 de maio de 2016 durante o imageamento do aglomerado estelar NGC 2281. Trata-se de um evento singular pois dois pulsos luminosos foram produzidos ao longo de sua trajetória na atmosfera. Os pulsos estão separados por uma distância angular de 69 minutos de arco ou, de acordo com os modelos aqui apresentados, por um intervalo

Tabela 4: Primeira coluna identifica o modelo; a segunda e a terceira colunas indicam o mineral de menor temperatura de fusão e sua contribuição em massa; a quarta e a quinta colunas indicam a substância de maior temperatura de fusão e sua contribuição em massa; a última coluna indica a massa total da PIP.

Modelo	Mineral 1	Massa(mg)	Mineral 2	Massa (mg)	Massa total (mg)
1	<i>SiO₂</i>	1,39	<i>MgO</i>	0,45	1,84
2	<i>SiO₂</i>	0,85	<i>FeO</i>	1,89	2,74
3	<i>Mg – olivina</i>	3,69	<i>FeO</i>	1,89	5,58
4	<i>Mg – olivina</i>	4,31	<i>MgO</i>	0,45	4,76
5	<i>FeO</i>	1,18	<i>MgO</i>	0,45	1,63

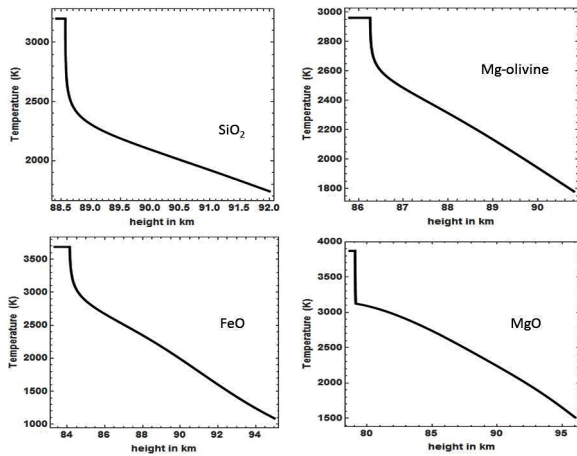


Figura 4: Variação da temperatura em função da altura acima da superfície terrestre para diferentes modelos. O platô nas curvas indica a fase de evaporação que ocorre à temperatura constante.

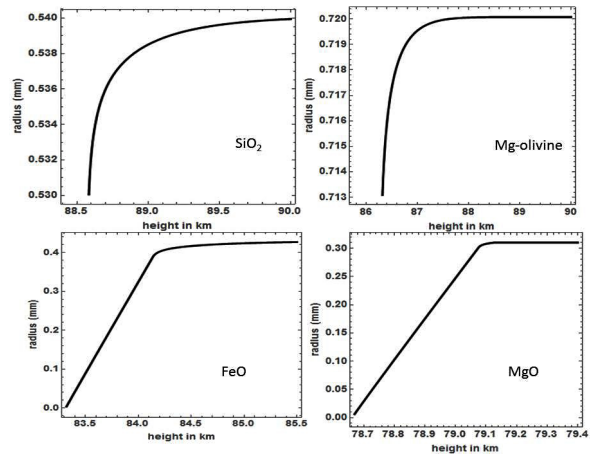


Figura 5: Variação do raio do meteoróide com a altura para diferentes modelos.

de tempo inferior a um segundo. Ambos os pulsos foram de magnitude comparável, $V = 8.04$, o que significa que não foram detectáveis à olho nu.

As trajetórias possíveis do bólido na atmosfera dependem da composição química do mesmo e de suas propriedades físicas. Pulsos com durações inferiores a 200 ms podem ser produzidos se a velocidade de entrada na atmosfera for da ordem de 35 km/s, formando um ângulo de 80° com a vertical. Nestas condições, fixada a composição química, a amplitude do pulso depende unicamente da dimensão do meteoróide.

A comparação entre as curvas de luz teóricas com o fluxo observado dos pulsos indica que os mesmos ocorreram em alturas da ordem de 80 – 90 km acima da superfície terrestre e que as dimensões do meteoróide devem estar no intervalo 0,3 – 0,7 mm, correspondendo a massas de alguns miligramas. Estes valores para a massa são cerca de duas ordens de grandeza do valor do pico da distribuição de massa. Isto sugere que o evento em questão deve ser relativamente raro

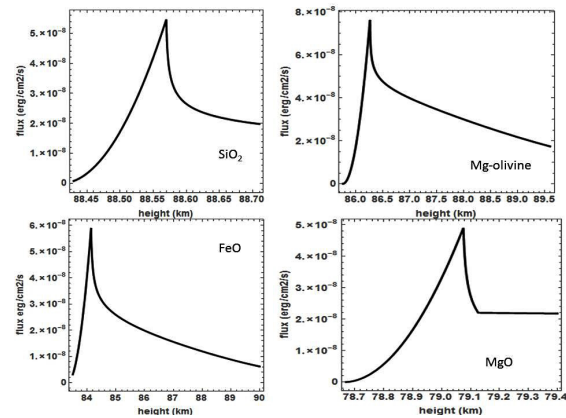


Figura 6: Curvas de luz teóricas. Os valores indicados nas ordenadas são “instantâneos”, isto é, correspondem a um dado instante ou equivalentemente a uma dada altura na atmosfera.

por se encontrar na asa massiva da função de distribuição.

Aqui é aventada a hipótese que os dois pulsos de luz observados são a consequência da evaporação de minerais com diferentes temperaturas de fusão, o que poderia ser um reflexo do processo de condensação ocorrido na nebulosa primitiva que deu origem ao sistema solar. Assim, óxidos como

o FeO ou o MgO teriam se condensado inicialmente e agregado os silicatos ou a olivina que se condensariam a temperaturas mais baixas. Isto demonstra que o estudo das PIPs pode trazer informações importantes sobre os processos físico-químicos que ocorreram nas primeiras fases de formação do sistema solar.

Sobre o autor

José Antônio de Freitas Pacheco (pacheco@oca.eu) é professor emérito do *Observatoire de la Côte d'Azur-OCA*, França. Formado na USP, foi diretor do IAG/USP, do Observatório Nacional/CNPq, e do próprio OCA. Membro da Academia Brasileira de Ciências, recebeu 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.

Referências

- [1] Z. Ceplecha e R.E. McCrosky, *Fireball end heights: A diagnostic for the structure of meteoric material*, J. Geophys. Res. **81**, 6257-6275 (1976).
- [2] J.M. Trigo-Rodriguez e J.Llorca, *The strength of cometary meteoroids: clues to the structure and evolution of comets*, Mont. Not. R. Astron. Soc. **372**, 655-660 (2006).
- [3] R.I. Hawkes e J. Jones, *A quantitative model for the ablation of dustball meteors*, Mont. Not. R. Astron. Soc; **173**, 339-356 (1975).
- [4] L.G. Jacchia, *The physical theory of meteors. VIII. Fragmentation as cause of the faint-meteor anomaly*, Astron. J. **121**, 521-527 (1955).
- [5] E.J. Opik, *Physics of meteor flight in the atmosphere*, (Interscience, Londres, 1958).
- [6] V.A. Bronshten, *Physics of meteoric phenomena*, (Reidel, Nova Iorque, 1983).
- [7] J.V. Evans, *Radar observations of meteor deceleration*, J. Geophys. Res. **71**, 171-188 (1966).
- [8] O. Kalashnikova, M. Horanyi, G.E. Thomas e O.B. Toon, *Meteoric smoke production in the atmosphere*, Geophys. Res. Lett. **27**, 3293-3296 (2000).
- [9] D.W. Hughes, *Cosmic Dust*, (J. McDonnell & A.M. Wiley, Londres, 1978).
- [10] L.A. Rogers, K.A. Hill e R.L. Hawkes, *Mass loss due to sputtering and thermal processes in meteoroid ablation*, Planet. Sp. Sci. **53**, 1341-1354 (2005).
- [11] T. Vondrak, J.M.C. Plane, S. Broadley e D. Janches, *A chemical model of meteoric ablation*, Atmos. Chem. Phys. **8**, 7015-7031 (2008).
- [12] A. Hedin, *Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere*, J. Geophys. Res. **96**, 1154-1172 (1991).
- [13] D.W. Sears e R.T. Dodd, *Meteorites and the Early Solar System*, ed. J.F. Kerridge & M.S. Matthews, (University of Arizona Press, Tucson, 1998).
- [14] M.E. Bailey, et al., 1994, *Hazards due to comets and asteroids*, eds. T. Gehrels, M. Shapley e M.A.M. Schumann, (The University of Arizona Press, 1994).
- [15] H.J. Melosh, *A hydrocode equation of state for SiO₂*, Meteor. Plan. Sci. **42**, 2079-2098 (2007).
- [16] P. Pradyot, *Handbook of Inorganic Chemicals*, (McGraw-Hill, Nova Iorque, 2002).
- [17] A.V. Fedkin, I. Grossman e M.S. Ghiorso, *Vapor pressures and evaporation coefficients for melts of ferromagnesian chondrule-like compositions*, Geochimica & Cosmochimica Acta **70**, 206-223 (2006).

Astrobiologia: como modelar o crescimento de organismos na Terra e em exoplanetas

Hermano Velten, Alcides Castro e Silva e Carlos Felipe Saraiva Pinheiro

Universidade Federal de Ouro Preto

Resumo

Vamos discutir o chamado modelo de Eigen utilizado para modelar a evolução do código genético de microorganismo. Este modelo determina, em termos do tamanho da cadeia de informação e de sua probabilidade de erro ao se multiplicar, quais configurações genéticas sobrevivem a longo prazo. Mostramos algumas simulações deste modelo e discutimos como utilizar este tema no estudo da astrobiologia.

Abstract

We discuss the so called Eigen model which is used to model the evolution of the genetic code of microorganisms. This model determines the long term survival of genetic configurations as a function of its genome length size and copy error. We show simulations of this model and discuss how to use this topic in the study of astrobiology.

Palavras-chave: astrobiologia, simulação, modelo de Eigen

Keywords: astrobiology, simulation, Eigen model

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31097](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31097)

1 Introdução

O prêmio Nobel em física de 2019 foi dividido entre os pesquisadores James Peebles, Michel Mayor e Didier Queloz. Enquanto o primeiro se notabilizou pelas suas contribuições ao desenvolvimento da cosmologia moderna, os dois últimos, no entanto, foram agraciados pela descoberta de um exoplaneta orbitando uma estrela muito similar ao nosso Sol. Esta descoberta ocorreu em 1995 e marcou o início de uma nova era na ciência onde a busca por exoplanetas tornou-se real e factível. Existem hoje mais de 4 mil exoplanetas¹ identificados e outros milhares de objetos candidatos aguardando confirmação.² Este número tenderá a aumentar consideravelmente nos próximos anos assim como aumentará também o conhecimento detalhado de suas propriedades físicas.

Questionar sobre a existência de vida em alguns destes exoplanetas é inevitável. Mas como deve ser feita esta abordagem? Quais ferramen-

tas a ciência utiliza nesta busca? A característica multidisciplinar deste tipo de investigação deu origem à Astrobiologia. Apesar de várias possíveis definições que o termo Astrobiologia possa ter, trata-se de compreender todos os aspectos físicos/químicos/biológicos da vida na Terra e como estes seriam replicados nos exoplanetas.

A Terra serve como único exemplo de planeta habitado e portanto é o único laboratório capaz de fornecer evidências científicas para o estudo da astrobiologia. Por exemplo, a evolução dos organismos ao longo da história do planeta Terra serve de ponto de partida para se especular como seria a evolução da vida nos exoplanetas. Enquanto a idade da Terra é estimada em cerca de 4,5 bilhões de anos, tendo se formada praticamente junto com o sistema Solar, registros geológicos conseguem fornecer indícios das primeiras formas de vida na Terra que datam a até 3,7 bilhões de anos atrás [1]. Sugere-se então que houve um período de incubação entre o instante em que a Terra já possuía as características mínimas para abrigar alguma espécie de vida e o surgimento das primeiras formas de vida. A partir deste momento, foram necessários bilhões de anos

¹Exoplaneta é definido como todo planeta que não pertence ao nosso sistema solar.

²<https://exoplanets.nasa.gov/>

até a vida evoluir de sua forma mais simplista até o aparecimento de vida complexa. Este cenário sugere que outros planetas possam ter uma trajetória evolutiva similar.

Neste artigo, vamos replicar um método que descreve a evolução de moléculas baseado na ideia de autorreprodução, cópias de si mesmas, sujeitas a uma taxa de mutação (erro ao reproduzir a cadeia que carrega alguma informação)³ que causa sua eliminação. Este modelo tem sua origem nos trabalhos pioneiros de Manfred Eigen⁴ onde princípios da cinética química e conceitos da chamada teoria da informação (entropia da informação)⁵ ditam a dinâmica evolutiva de organismos. Nesta abordagem há um limite bem claro que determina quais organismos cujas populações prosperam ou são eliminadas em função do tamanho de sua cadeia e de sua taxa de mutação.

A idade da Terra será utilizada como padrão para determinar quais configurações moleculares obtiveram sucesso no processo reprodutivo aumentando e mantendo suas populações por um período de tempo da ordem de bilhões de anos.

Na próxima seção, demonstramos o modelo de reprodução utilizado em nossas simulações e os principais resultados são apresentados. Discutimos também algumas variantes do modelo de Eigen. Fazemos nossas considerações finais na última seção.

2 Evolução da informação genética: O modelo de Eigen

Tão importante quanto entender os mecanismos que deram origem à vida é compreender os processos de evolução e aperfeiçoamento das formas mais primitivas que habitaram nosso planeta.

Seja um organismo primitivo com uma cadeia de informação cujo tamanho é dado por um número inteiro L . Este organismo é capaz de se

³Mesmo que a analogia com o código genético se aplique, evitamos usar tal termo por entender que o gene envolve uma complexidade bem maior do que aqui apresentamos.

⁴Manfred Eigen (9 de maio de 1927 – 6 de fevereiro de 2019), Prêmio Nobel de Química de 1967

⁵Também conhecida como entropia de Shannon. Claude Elwood Shannon (30 de abril de 1916 - 24 de fevereiro de 2001). Grosso modo, a entropia de uma variável é a “quantidade de informação” contida na variável. Nesse caso, a variável em questão é a quantidade de informação que flui no sistema.

replicar dando origem a novas gerações com um número σ de descendentes. De acordo com Eigen a condição para que esta população sobreviva a longo prazo (critério de sobrevivência) é dada pela condição,

$$pL < \ln \sigma, \quad (1)$$

onde p é a probabilidade de acontecer um erro em qualquer posição do seu código [2]. Vamos chamar essa variável de *Probabilidade de erro em uma unidade de código ou lacuna*, ou seja, a probabilidade de se inserir o menor erro possível. De modo bem simplista, esse erro, ou mutação, pode ser entendido como uma cópia imperfeita de uma informação, quando a mesma é replicada. Em geral, mutações não são benéficas para o organismo embora que, na prática, uma certa taxa de erro no processo de reprodução é essencial para a evolução via seleção natural. Entretanto taxas muito altas de mutações tendem a levar à extinção, ou *Mutation Meltdown*.

Para ilustrar a relação de Eigen, seja, por exemplo, um organismo extremamente simples que possui sua informação codificada em uma cadeia de tamanho $L = 2$. Assim, existem 2 espaços onde informação pode ser depositada. O número de diferentes algarismos/letras que pode ser colocado em cada lacuna não é relevante aqui. No processo de replicação, caso a informação contida seja fielmente copiada para a próxima geração, este organismo dará origem a $\sigma = 2$ descendentes. A população total agora será $N = 2$ pois o indivíduo original deixou de existir. O tamanho da população crescerá obedecendo uma progressão geométrica enquanto não houver erro na cópia. A cada nova geração formada a probabilidade de erro p atua em cada uma das $L = 2$ lacunas. Ainda neste exemplo, vamos admitir agora que a informação alocada em cada lacuna seja binária (podemos pensar em algo como ativar ou desativar certos processos bioquímicos desse organismo). Um organismo com uma cadeia $(0, 0)$ pode ter apenas os seguintes destinos: não sofrer mutação alguma e ficar como $(0, 0)$, sofrer 1 mutação na primeira ou na segunda posições e se tornar $(1, 0)$ ou $(0, 1)$, ou sofrer uma mutação na primeira posição e uma na segunda, transformando-se em $(1, 1)$. Se a probabilidade de haver um erro em cada lacuna é p , então a probabilidade de não haver erro é $q = 1 - p$, e assim a chance de o organismo não ser afetado pelo erro é $qq = q^2$, de ser afetado por um erro apenas é $pq + qp = 2pq$

e de ser afetado por dois erros é $pp = p^2$. Note que a chance total do organismo ser afetado ou não pelo erro é $p^2 + 2pq + q^2 = (p + q)^2 = 1$ ou 100%. No caso do nosso organismo simples, se $p = 0.1$, então $q = 0.9$, e a probabilidade de não sofrer mutação é $q^2 = 0.9^2 = 0.81$, de sofrer uma mutação apenas é $2pq = 0.18$ e de sofrer duas mutações é $p^2 = 0.01$. Assim sendo, a chance total desse organismo em ter uma cópia errada é $p^2 + 2pq = 0.19$. Nesse quadro, como se comportaria um organismo um pouco mais complexo, agora com uma cadeia de tamanho $L = 5$? Para esse caso temos $(p + q)^5 = p^5 + 5p^4q + 10p^3q^2 + 10p^2q^3 + 5pq^4 + q^5 = 1$. Note que, com exceção do termo q^5 , que representa a possibilidade desse organismo de não sofrer nenhum erro na sua cadeia quando esta é replicada, todos os outros termos dessa equação são probabilidades de inserção de erro, desde somente uma, até todas as posições.⁶ Como exemplo, para esse novo organismo, a probabilidade de ocorrer erro em apenas uma posição é $5pq^4 = 0.33$. Note que, para o organismo mais simples descrito acima ($L = 2$) a possibilidade de erro em apenas uma posição era 0.18 ou 18%, enquanto que para esse organismo mais sofisticado ($L = 5$) essa mesma probabilidade é 0.33 ou 33%. Se formos levar em conta todas as mutações, e não apenas aquelas que ocorrem em uma posição, para o caso de $L = 2$ temos $p^2 + 2pq = 0.19$ e para $L = 5$ temos $p^5 + 5p^4q + 10p^3q^2 + 10p^2q^3 + 5pq^4 = 0.41$, o que piora ainda mais o quadro dos organismos mais complexos. Isso mostra que, a medida que os organismos se tornam mais complexos, tornam-se também mais suscetíveis à introdução de erros pontuais em suas unidades de código, ou seja, em se tratando de reprodução sexuada, a natureza pode exigir dos organismos um balanço entre o quanto de erros em sua cadeia ele suporta de modo a manter a sua complexidade.

Na Figura 1, é possível visualizar a relação de Eigen (1) em um diagrama que conta como parâmetros o comprimento da palavra (L) e a Probabilidade de erro em uma unidade de código (p). Cada faixa horizontal compreende a região de complexidade de certos seres vivos. Vírus possuem genomas muito simples que podem ser analisados por meio de técnicas modernas de

⁶De um modo geral, essas probabilidades podem ser calculadas pelo binômio de Newton, onde $(p + q)^L = \sum_{k=0}^L \binom{L}{k} p^{L-k} q^k$, e $\binom{L}{k} = \frac{L!}{k!(L-k)!}$

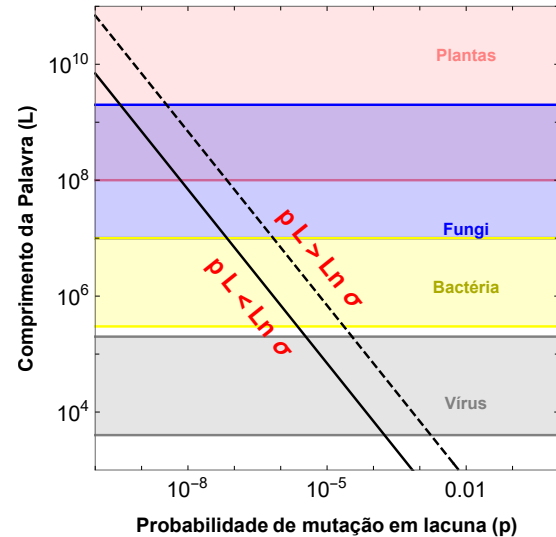


Figura 1: Espaço de fase para o comprimento da palavra (L) em função da probabilidade de erro em unidade de código ou lacuna (p). Na região abaixo da linha sólida (tracejada) a condição de Eigen prevê a sobrevivência da população com taxa de reprodução $\sigma = 2$ ($\sigma = 1000$). Cada faixa horizontal indica a complexidade (dada em função do comprimento da palavra) de algumas formas de vida conhecidas.

sequenciamento. Seu código genético possui um tamanho de cerca de $\sim 10^4$ nt.⁷ Em organismos mais complexos este número pode ser da ordem de 10^{12} pb, como nos peixes. A relação de Eigen é plotada nas curvas pretas sólidas e tracejadas para organismos que geram $\sigma = 2$ e $\sigma = 1000$ descendentes, respectivamente. As regiões neste plano acima destas linhas pretas determinam as configurações genéticas que não sobrevivem no longo prazo de acordo com a relação (1).

A Figura 2 mostra uma simulação de 3 populações tendo cada uma delas uma cadeia de tamanho diferente, $L = 69$, $L = 70$ e $L = 71$, e todas inicialmente com 1000 organismos. Nesta simulação, cada nova geração originará $\sigma = 2$ descendentes. Podemos ver que as populações com códigos maiores acumulam mais erro, extinguindo-se primeiro, e, de acordo com a Eq. (1), temos um limiar quando $pL > 0.693$, que define quando a população se mantém ou não.

Para o caso de um organismo genérico com informações genéticas arquivadas em uma palavra de tamanho L , podemos calcular a probabilidade P_M do organismo morrer em função de um número mínimo de erros M , sendo que esse organismo está sujeito a uma taxa de mu-

⁷nt=nucleotídeos, usado para fita simples (RNA); bp=pares de bases, usado para fita dupla (DNA)

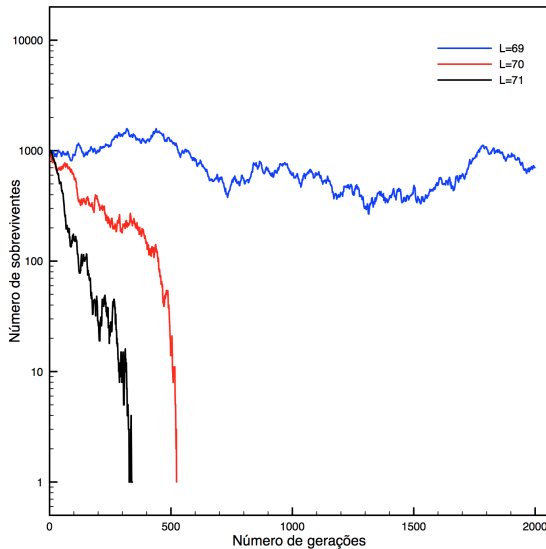


Figura 2: Simulação da evolução temporal para 3 populações com diferentes tamanhos de cadeias $L = 69$, $L = 70$ e $L = 71$, com uma taxa de mutação $p = 0.01$, número de filhotes $\sigma = 2$ e população inicial de 1000 organismos. Com esses parâmetros, de acordo com (1) temos $\ln(2) = 0.693$, e, para $p = 0.01$ o limiar é atingido em $69 < L < 70$. Simulação baseada na discussão proposta em [4].

tação p em cada unidade de informação toda vez que ele se divide. Por exemplo, se o organismo morrer com apenas um erro em sua sequência $P_1 = 1 - (1 - p)^L$. Caso ele suporte um erro, mas morra com dois ou mais erros temos $P_2 = 1 - (1 - p)^L - Lp(1 - p)^{L-1}$, e assim sucessivamente.⁸

A relação entre P_1 e p pode ser visualizada para 3 organismos com tamanhos de cadeias diferentes através da Figura 3. Podemos notar que, apesar de P_1 sempre aumentar com p , em cadeias grandes $P_1 \rightarrow 1$ muito mais rapidamente, evidenciando o fato que organismos mais complexos são muito mais sensíveis a uma dada taxa de erro em sua cadeia. O aumento de complexidade dos organismos só foi possível com o aparecimento de estratégias de minimização e remoção de erros quando há replicação. Assim sendo, esses organismos simples devem ter durado tempo suficiente para que essas estratégias aparecessem, e é esse tempo que esse estudo tenta inferir.

A condição (1) surge como limite assintótico

⁸Uma técnica útil no cálculo de probabilidades é: quando parecer difícil calcular a probabilidade de um evento ocorrer, tente calcular a probabilidade dele não ocorrer, e subtraia de 1. Aqui a probabilidade de não haver erro é $q^L = (1 - p)^L$, e assim a probabilidade de haver erro é $1 - q^L = 1 - (1 - p)^L$.

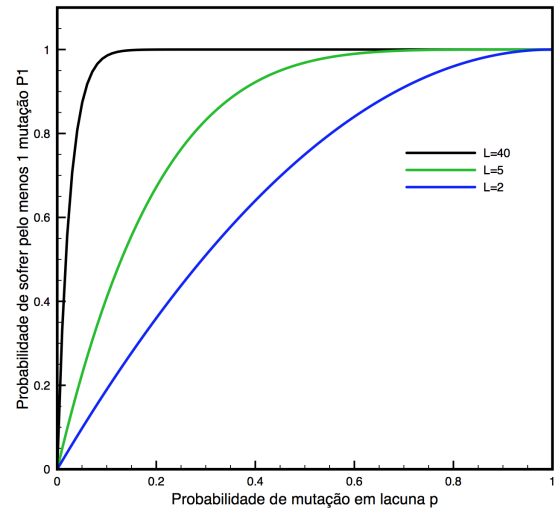


Figura 3: Probabilidade de haver pelo menos uma mutação P_1 em função de probabilidade de erro em uma unidade de código ou lacuna p para três organismos com $L = 40$ (curva preta), $L = 5$ (curva verde) e $L = 2$ (curva azul).

de uma equação diferencial, construída através de técnicas de cinética química, cuja dedução completa vamos omitir nesse texto. No entanto, podemos chegar à relação de Eigen (1), a partir de uma equação de dinâmica populacional, que nada mais é que uma relação de recorrência, prevendo a variação ΔN da população entre um instante t e um instante posterior $t + \Delta t$. Seja $N(t)$ a população no instante t , e seja Δt o tempo necessário para ocorrer um ciclo de replicação. Se cada indivíduo dá origem a outros σ , indivíduos, neste intervalo ocorrem, portanto, $\sigma N(t)$ nascimentos. Se houvessem apenas nascimentos, teríamos uma variação $\Delta N = \sigma N(t)$ entre os instantes t e $t + \Delta t$. Mas é preciso lembrar que na reprodução assexuada um indivíduo dá lugar a σ indivíduos ($N(t)$ mortes). Além disso, é preciso descontar as $p_1 \sigma N(t)$ mortes por erros de replicação. O índice M em P_M indica que o organismo resiste a apenas M mutações a cada reprodução. Dito isso, chegamos a taxa de variação de indivíduos:

$$\Delta N = \sigma N(t) - N(t) - P_1 \sigma N(t). \quad (2)$$

E como $\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t)$ e a probabilidade de ocorrer ao menos um erro de cópia é $P_1 = 1 - (1 - p)^L$, chegamos à relação:

$$N(t + \Delta t) = (1 - p)^L \sigma N(t). \quad (3)$$

A Eq. (3) é o mapa iterativo de nossa dinâmica. Partindo de uma população inicial $N(0)$

e aplicando essa relação iterativamente é possível obter o valor previsto para a população nos instantes discretos subsequentes. Na Eq. (3), é possível ver como o crescimento ou declínio da população dependem do número L de lacunas de informação e da probabilidade p de um erro de cópia ocorrer. A condição para a população crescer é que $(1 - p)^L \sigma > 1$, ou *mutatis mutandis*,

$$L \ln(1 - p) > -\ln \sigma. \quad (4)$$

Multiplicando-se ambos os lados da Eq.(4) por -1 e lembrando que para $p \ll 1$, $\ln(1 - p) \approx -p$ chegamos à condição (1) para que a população sobreviva $pL < \ln \sigma$.

3 Mecanismo de correção de erro de replicação

A partir da análise da Figura 1 percebemos que a sobrevivência de organismos com $L \sim 10^8$ só é possível se sua reprodução ocorre com uma taxa de erro da ordem $p \sim 10^{-8}$ ou menor. Cadeias mais simples, $L \sim 10^4$, são capazes de sustentar um erro maior. A partir desta observação, nota-se que organismos modernos evoluíram aprimorando o processo reprodutivo por meio do desenvolvimento de métodos apurados de correção de erros e diminuição de sua taxa de ocorrência. Mas como isso pode ser introduzido no modelo de Eigen?

A Eq. (3) define nosso modelo de dinâmica populacional para o caso em que a ocorrência de um erro de cópia define a não viabilidade de um descendente. Podemos reescrever esta relação de uma forma mais simples:

$$N(t + \Delta t) = (1 - P_1)\sigma N(t). \quad (5)$$

O que muda quando surge um mecanismo capaz de corrigir esse erro de cópia? Imaginemos que esse mecanismo fosse capaz de corrigir apenas um erro que surgisse em alguma lacuna. Isso ainda levaria à inviabilidade daquelas cópias onde ocorrem dois erros ou mais, o que ocorre com probabilidade $P_2 = 1 - (1 - p)^L - Lp(1 - p)^{L-1}$. Neste cenário, na Eq. (5) deve-se trocar a probabilidade P_1 pela probabilidade P_2 .

A Eq. (5) mostra que uma população só é viável quando

$$P_M < 1 - \frac{1}{\sigma}, \quad (6)$$

onde o subscrito M pode ser:

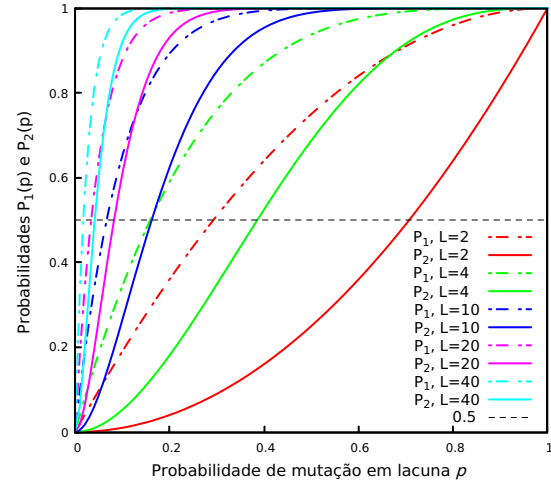


Figura 4: Comparação das curvas de P_1 (linhas tracejadas) e P_2 (linhas contínuas), como função de p . Cores iguais mostram P_1 e P_2 para organismos com um mesmo valor de L . Caminhando sobre a linha tracejada 0,5, entre as curvas azul escuro descontínua e magenta contínua, estamos numa faixa de valores de p onde não é possível existir estruturas com $L = 10$, se não houver mecanismo de correção ($P_1 > 0.5$); mas se este mecanismo estiver presente é possível a existência de populações com $L = 20$ ($P_2 < 0.5$). Abaixo da linha horizontal tracejada existe viabilidade para $\sigma = 2$.

- $M = 1$, no caso P_1 , quando não pode ocorrer nenhum erro de cópia; ou
- $M = 2$, no caso P_2 , quando há mecanismo para correção de um erro.

No caso específico em que $\sigma = 2$, essa condição se resume a $P_M < 1/2$.

A Figura 4 mostra as probabilidades P_1 e P_2 como função de p , para alguns valores de L . A linha horizontal nos mostra a probabilidade de corte 1/2 do caso $\sigma = 2$. Comparando essas curvas para um valor específico de p , é possível notar como o mecanismo de correção de um único erro aumenta a viabilidade de populações com L significativamente maiores. Este mecanismo de correção, por exemplo, garante o surgimento de organismos de maior complexidade.

4 Modelo de Eigen e exoplanetologia

Nesta seção, buscamos discutir como se daria a utilização dos conceitos discutidos nas seções anteriores ao estudo de exoplanetas. Ficará claro que trata-se de um tópico ainda muito especulativo na ciência. Muito provavelmente trataremos

mais perguntas do que respostas, mas nossa intenção é conduzir o leitor à reflexão sobre alguns aspectos da astrobiologia.

É importante lembrar que o planeta Terra possui características muito especiais. Ele orbita sua estrela hospedeira, o nosso Sol, a uma distância ideal, dentro da chamada zona de habitabilidade (ZH) do sistema solar, que é definida como a região onde é permitida a existência de água em sua fase líquida. A água, em sua fase líquida, é considerada um solvente universal e meio necessário para que ocorram as reações químicas necessárias para o desenvolvimento das formas primitivas de vida. O planeta Marte, por exemplo, está no limite desta zona. Saturno e demais planetas exteriores encontram-se fora dessa região, onde seria “muito frio”. Por outro lado, Mercúrio e Vênus encontram-se na região “muito quente” e também fora da ZH. A definição da ZH de um sistema planetário é um dos principais aspectos da astrobiologia.

Outro fator importante, e muito relevante para discussão deste artigo, é a idade do sistema planetário. O nosso Sol tem uma idade aproximada de 4,5 bilhões de anos. A formação dos planetas ocorreu praticamente na mesma escala de tempo. Assim, considera-se que sistemas planetários possuem a mesma idade que sua estrela hospedeira. A Terra era um ambiente hostil para o desenvolvimento de vida em seus primeiros instantes. Estima-se que a Terra foi fortemente bombardeada por meteoritos desde sua formação até cerca de 3,9 bilhões de anos atrás. Ou seja, considera-se que em seus primeiros 600 milhões de anos o planeta Terra era estéril. E quando surgiram os primeiros organismos no nosso planeta? A análise de fósseis de estromatólitos (uma rocha fóssil formada por atividades de microrganismos em ambientes aquáticos) revela que estes organismos, que seriam os primeiros organismos terrestres, surgiram há cerca 3,7 bilhões de anos.

O objetivo da discussão feita no parágrafo anterior é revelar que o surgimento dos primeiros organismos em um planeta pode necessitar de apenas algumas centenas de milhões de anos. Uma estimativa razoável que podemos fazer é que, caso o sistema planetário necessite de cerca de 100 milhões de anos para se formar e que, após esse período, necessite de outros 100 milhões de anos de incubação até o surgimento das primeiras formas de vida, pode-se descartar sistemas planetários

extremamente jovens (estrelas hospedeiras com idades na casa de dezenas de milhões de anos) como alvos na busca de vida fora da Terra. No entanto, estrelas muito jovens são muito raras e, quando encontradas, residem em ambientes de alta formação estelar.

De fato, a vida necessita de tempo para se desenvolver. Em astrofísica existe uma relação entre a massa e idade de estrelas. Quanto mais massiva, menor seu tempo de vida. Portanto, estrelas com massas $\sim M_{\odot}$ possuem um tempo de vida da ordem de bilhões de anos tornando-se os candidatas preferenciais.

A simulação apresentada na Figura 2 utiliza o número de gerações como variável temporal. Mas quanto tempo leva para uma população se multiplicar? Obviamente a resposta para esta pergunta dependerá do tipo de organismo. Se tomarmos como exemplo organismos mais simples, como bactérias, existem experimentos conduzidos com culturas de *Escherichia coli* cujas populações são cultivadas por décadas em laboratórios. Alguns estudos reportam taxas de reprodução destas bactérias da ordem de 60 mil gerações em 25 anos [5] e 40 mil gerações em 20 anos [6]. Assim, como valor médio, podemos inferir que a taxa de reprodução destes organismos é da ordem de 6 gerações por dia. Assumindo este resultado, e de volta à Figura 2, podemos concluir que as populações representadas pelas curvas pretas ($L = 71$) e vermelhas ($L = 70$) sobreviveram por períodos de semanas a poucos meses, enquanto que a população com $L = 69$, assim como previsto pelo critério de Eigen, terá sua sobrevivência garantida no longo prazo.

Neste artigo, discutimos os aspectos mais básicos do modelo de Eigen. Nosso objetivo é aplicar estes conceitos em alguns problemas de astrobiologia. Existem muitas perguntas ainda sem resposta. Uma proposta futura é aperfeiçoar o próprio modelo. Por exemplo, podemos pensar em micro-organismos cuja probabilidade de erro em lacuna evolui com o número de gerações e isto de fato ocorreu na história da evolução da vida na Terra [7]. Outro ponto interessante é o questionamento se este modelo pode ser aplicado em outros planetas. Em caso afirmativo, quais são as condições necessárias para um exoplaneta que simule a evolução da vida assim como ocorreu na Terra? Ainda, pretendemos simular o modelo de Eigen para valores de L e σ mais próximos dos

valores que conhecemos para alguns organismos como vírus e bactérias, por exemplo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio de PROPP/UFOP, CNPq, FAPEMIG e FAPES.

Sobre os autores

Hermano Velten (hermano.velten@ufop.edu.br) é doutor em física pela UFES e tem foco de suas pesquisas nas áreas de astrofísica e cosmologia.

Alcides Castro e Silva (alcides@ufop.edu.br) é doutor em física pela UFMG e pesquisa temas ligados à sistemas complexos, mais precisamente ecologia e dinâmicas urbanas.

Carlos Felipe S. Pinheiro (felipe@ufop.edu.br) é doutor em ciência de materiais pela UFOP e mestre em física aplicada à biologia pela USP, sempre atuando com simulação de sistemas complexos.

Referências

- [1] B. Pearce, A. Tupper, R. Pudritz, P. Higgs, *Constraining the Time Interval for the Origin of Life on Earth*, *Astrobiology* **3**, 343–364 (2018).
- [2] M. Eigen, *Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules* *Naturwissenschaften* **58**, 465–523 (1971).
- [3] J. Coolidge, *The story of the binomial theorem*, *The American Mathematical Monthly*, **56**, 3, 147-157 (1949).
- [4] A. Brandenburg, *Nonlinear aspects of astrobiological research*, in *Encyclopedia of Complexity and System Science*, editado por R. A. Meyers (Springer, 2009), 3284-3300.
- [5] R. Lenski, *Experimental evolution and the dynamics of adaptation and genome evolution in microbial populations*, *ISME J* **11**, 2181–2194 (2017).
- [6] J. Barrick, D. Yu, S. Yoon, et al., *Genome evolution and adaptation in a long-term experiment with Escherichia coli*, *Nature* **461**, 1243–1247 (2009).
- [7] F. J. Dyson, *Origins of life* (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).

Sequências didáticas para o ensino de astronomia utilizando o Stellarium

Adriano M. Oliveira¹, Cibele Kemeicik², Augusto C. T. Monteiro¹, Thalita S. Benincá¹, Carlos Daniel da S. Mattos¹ e Guilherme L. Schmidt¹

¹Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Guarapari

²Secretaria Municipal de Educação de Guarapari/ES

Resumo

Esse artigo apresenta o resultado da aplicação de três sequências didáticas, alinhadas às habilidades e competências da Base Nacional Comum Curricular, dentro da temática de astronomia. Estas sequências foram desenvolvidas durante a execução do plano de trabalho de Iniciação Científica Júnior (alunos de ensino médio) do Observatório Astronômico do IFES-Guarapari (OAIG) e resultaram na(o): (1) determinação da massa de Júpiter, calculada a partir do eclipse de Io; (2) reconhecimento das crateras e mares lunares; (3) construção do diagrama H-R para as estrelas mais próximas.

Abstract

The goal of this paper is to present three proposals of didactics sequence with astronomical thematic taking alignment with BNCC. They were developed during the work plan progress of students of high school connected with OAIG. As a final result of the students practices, they: (1) determined the mass of Jupiter by Io eclipse; (2) recognized crateras and seas of the Moon; and (3) constructed the H-R diagram for the near stars.

Palavras-chave: ensino, sequência didática, astronomia, Stellarium, modelo matemático.

Keywords: learning, didactics sequence, astronomy, Stellarium, mathematical modeling.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.30532](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.30532)

1 Introdução

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) [1], aprovada no ano de 2018, traz alguns desafios para os professores da educação básica. Dentre estes entraves, destaca-se o fato de que certos conteúdos trazidos pelo novo currículo não são trabalhados, ou são de forma superficial, durante a formação destes profissionais, como é o caso da astronomia que, por sua vez, foi uma das áreas que mais ganhou espaço dentro desse novo currículo.

Uma análise das tabelas contidas nesse documento permite observar que houve uma distribuição de temas ligados ao estudo do céu em todo o currículo, seja de forma direta ou comunicando-se com outros conteúdos. Desde o ensino fundamental, cujo tema é tratado dentro do eixo Ciências da Natureza, Terra e Universo, chegando até o ensino médio, cuja abordagem é feita dentro da

relação entre Tecnologia e Ciências da Natureza, já que uma compreensão contemporânea do universo físico, da vida planetária e da vida humana está conectada ao entendimento dos instrumentos com os quais o ser humano maneja e investiga o mundo natural. Nesse contexto, algumas habilidades e competências são desenvolvidas em momentos bem determinados. Por exemplo:

(EF01CI05) - Identificar e nomear diferentes escalas de tempo: os períodos diários (manhã, tarde, noite), sucessão de dias, semanas, meses e anos;

(EF01CI06) - Selecionar exemplos de como a sucessão de dias e noites orienta o ritmo de atividades diárias de seres humanos e de outros seres vivos.

A título de análise, o conjunto de letras e números dentro dos parênteses são os códigos das habilidades dentro da BNCC, o significado está ligado

ao que deve ser abordado, em que momento isso acontece e a quem compete a abordagem, como é o caso da habilidade (*EF01CI05*), que deve ser abordada no ensino fundamental (*EF*), durante o primeiro ano (*01*), pelo professor de ciências (*CI*) e essa é a quinta (*05*) habilidade a ser trabalhada. Outras citações desse tipo serão feitas dentro das sequências didáticas e têm a finalidade de destacar onde cada habilidade da BNCC é trabalhada. Assim, o ensino básico tem um currículo norteador, que garante aos estudantes o direito de aprender um conjunto de habilidades comuns e que está em concordância com o Plano Nacional de Educação (PNE) [2] e com a Lei de Diretrizes e Bases para a educação nacional (LDB) [3].

Ainda, na linha dos desafios encontrados pelos professores, tem-se a aplicabilidade das habilidades, como é o caso das citadas acima, fato inerente às ciências da natureza. O alinhamento dessa aplicabilidade com o artigo 8º da BNCC aumenta o desafio deste profissional, a saber:

Os currículos, coerentes com a proposta pedagógica da instituição ou rede de ensino, devem adequar as proposições da BNCC à sua realidade, considerando, para tanto, o contexto e as características dos estudantes, devendo IV. Conceber e pôr em prática situações e procedimentos para motivar e engajar os estudantes nas aprendizagens [1, art. 8].

Nesse ponto, em particular, a implementação de metodologias ativas pode ser uma forma de adequar a realidade escolar aos documentos que regem a educação básica. Apesar deste artigo não utilizar tal metodologia, as sequências didáticas, aqui apresentadas, podem ser adaptadas a ela, seguindo o proposto em [4].

Com isso em mente, durante a execução dos planos de trabalho (PT) dos alunos de Iniciação Científica Júnior (IC-Jr) do Observatório Astronômico do IFES-Guarapari (OAIG), três tópicos foram selecionados e transformados em sequência didática (SD), a saber: determinação da massa de Júpiter, reconhecimento das crateras e mares lunares e a construção de um diagrama H-R. Aqui, apresentaremos uma sistematização das atividades utilizando o Stellarium como ferramenta para a coleta de dados.

2 A observação do céu noturno: Júpiter, Lua e constelações

Revolucionando não só o modo como a humanidade enxergava o universo, mas também a forma de compreender a ciência no século XVII, Galileu Galilei (1564-1642) foi um astrônomo renascentista que, dispondo de uma luneta para a observação celeste, obteve evidências para a comprovação do modelo heliocêntrico proposto por Nicolau Copérnico. Por meio do aperfeiçoamento do telescópio, criação atribuída ao oculista Hans Lippershey (1570-1619), Galileu pôde empregá-lo em suas observações atreladas a extraordinárias descobertas que viriam mudar a concepção a qual o ser humano detinha sobre o cosmos. Utilizando do princípio descoberto por Lippershey, que a combinação de lentes a uma determinada distância promovia o aumento de objetos distantes, o astrônomo italiano conseguiu aprimorar a capacidade de aproximação em três vezes, e, posteriormente, construiu instrumentos com um potencial trinta vezes maior,¹ citada pelo filósofo Alexandre Koyré:

Montanhas na Lua, novos “planetas” no céu, novas estrelas fixas em número tremendo, coisas que nenhum olho humano havia jamais visto e que nenhuma mente humana havia concebido anteriormente. E não só isso: além desses fatos novos, estarrecedores e inteiramente inesperados e imprevistos, havia ainda a descrição de uma invenção assombrosa, a do perspicillum,² um instrumento - o primeiro instrumento científico - que havia tornado estas descobertas possíveis e possibilitado a Galileu transcender a limitação imposta pela natureza - ou por Deus - aos sentidos e ao conhecimento humano [5, p.81].

Em 1610, as descobertas astronômicas de Galileu Galilei são publicadas na obra denominada "Sidereus Nuncius" (O Mensageiro Sideral), nela são expostos as irregularidades da superfície lunar e alguns aglomerados de estrelas, além do aspecto mais importante da obra, a evidencição de quatro luas orbitando Júpiter. A partir do seu trabalho, abriu-se a possibilidade de refutação do modelo ptolomaico, uma vez que, ali, desenvolveram-se argumentos que reafirmaram as

¹Um texto mais detalhado pode ser encontrado em www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/aulas_11/Galileu_observacoes_tel_v3.htm.

²Perspicillum foi a denominação dada por Galileu ao seu aparato astronômico, conhecido atualmente como luneta.

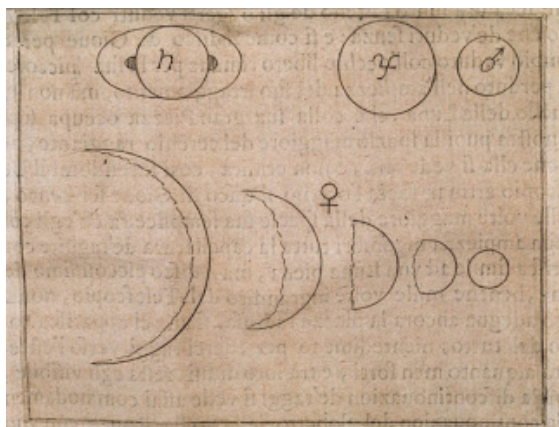


Figura 1: Representação das observações feitas por Galileu, publicadas na obra “O Experimentador”. Na parte superior, da esquerda para a direita, temos: (a) Saturno e seus anéis, ilustrado como três esferas; (b) Júpiter e (c) Marte. Na parte inferior estão ilustradas as fases de Vênus. Fonte: www.astronomy2009.org.

conclusões que Nicolau Copérnico havia defendido em “*De Revolutionibus Orbium Coelestium*” (Sobre a revolução das esferas celestes), ou seja, a Terra era parte de um sistema planetário em que eram descritas órbitas ao redor do Sol.

A observação das fases de Vênus foi uma das evidências que colaboraram com o declínio do modelo ptolomaico. Galileu, usando sua invenção, notou que Vênus têm fases, semelhante ao que acontece na Lua. As conclusões obtidas a partir disso dizem respeito aos planetas não apresentarem luminosidade própria, já que brilham quando recebem luz solar e que as mudanças aparentes das porções visíveis de Vênus somente poderiam ser explicadas caso fosse admitido que o planeta realizasse uma trajetória ao redor do Sol. Ademais, empregando sua luneta também conseguiu observar os anéis de Saturno, todavia, como o equipamento não tinha a resolução necessária para que a estrutura fosse vista nitidamente, Galileu descreveu o planeta de modo que fosse formado por três esferas, com uma lua bem próxima em cada lado, intitulando de “planeta com uma par de orelhas”, como mostra a Figura (1).

2.1 Determinando a massa de Júpiter

Indubitavelmente, o aspecto mais significativo da obra de Galileu foi a importante descoberta de quatro estrelas errantes movendo-se em torno de Júpiter. A partir disto, foi realizado um estudo e acompanhamento detalhado das posições dessas estruturas ao redor do gigante gasoso,

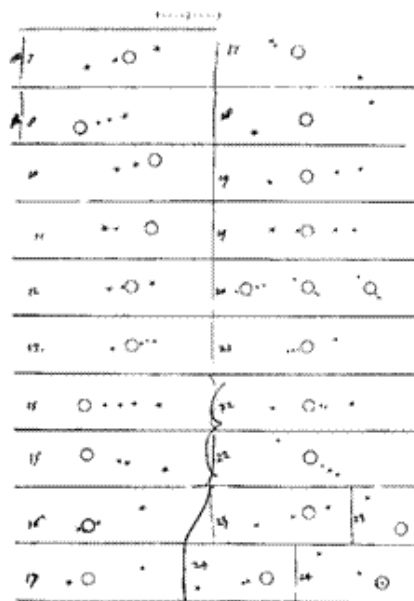


Figura 2: Representação da posição das luas de Júpiter. Fonte: www.if.ufrgs.br/mpef/mef008/aulas_11/Galileu_observacoes_tel_v3.htm.

representando-os através de Figuras (2) e atribuindo a designação de planetas mediceanos, em homenagem ao grão-duque da Toscana, de modo que a posteriori passaram a ser consideradas satélites naturais e nomeadas de: Io, Ganimedes, Calisto e Europa. À vista disso, a evidenciação de luas orbitando outro planeta mostrou que o movimento dos corpos celestes não aconteciam somente em torno da Terra, como previa o modelo geocêntrico, assim, mesmo que indiretamente, são obtidos indícios que comprovam o sistema copernicano.

Uma discussão acerca dessas observações com simulações, usando as datas e horários históricos, bem como a relação do movimento das luas observado por Galileu e um paralelo com o movimento harmônico simples, pode ser encontrada em [6]. Seguindo essa linha, utilizaremos a determinação da massa do planeta Júpiter como um dos temas de pesquisa da SD. Dentro desse contexto, traçaremos uma estratégia para conduzir o aluno durante sua pesquisa, dividindo a temática em etapas.

J1 - Caracterização das estruturas do sistema solar

Iniciamos essa abordagem partindo do conhecimento dos alunos acerca das estruturas que compõem o Sistema Solar. Perguntas sobre os planetas, luas, asteroides e outros corpos devem ser reali-

zadas. Além disso, podem ser incentivadas pesquisas sobre o tamanho, a massa, o movimento e outras características dessas estruturas. Para auxiliar nessa abordagem, a referência [7] pode ajudar. Em sala de aula, as informações coletadas pelos alunos podem ser utilizadas para mostrar que o Sol detém 99,86 % da massa total do Sistema Solar e que Júpiter tem uma massa (M_J) maior que o dobro das soma das massas (M) dos demais planetas, $M_J = 2,5M$.

Cumprida essa etapa, o aluno conseguirá identificar os planetas e os corpos menores - tais como: planetas anões, luas, meteoros e cometas. Para conduzir esse estudo teórico, pode ser utilizado a Referência [8].³

Durante a execução dessa tarefa o professor trabalhará as seguintes habilidades da BNCC:

EF09CI14 - Descrever a composição e a estrutura do Sistema Solar (Sol, planetas rochosos, planetas gigantes gasosos e corpos menores), assim como a localização do Sistema Solar na nossa Galáxia (a Via Láctea) e dela no Universo (apenas uma galáxia dentre bilhões);

EF09CI16 - Selecionar argumentos sobre a viabilidade da sobrevivência humana fora da Terra, com base nas condições necessárias à vida, nas características dos planetas e nas distâncias e nos tempos envolvidos em viagens interplanetárias e interestelares;

EF09CI15 - Relacionar diferentes leituras do céu e explicações sobre a origem da Terra, do Sol ou do Sistema Solar às necessidades de distintas culturas (agricultura, caça, mito, orientação espacial e temporal etc).

J2 - Observação dessas estruturas

Nessa etapa, iniciamos a localização das estruturas celestes por meio da observação do céu noturno. Em sala de aula, a utilização de simuladores de céu, como o Stellarium,⁴ torna-se uma ferramenta essencial. Além disso, o uso de cartas celestes⁵ pode ampliar a capacidade de abstração, localização, posicionamento e leitura. Esse trabalho de localização dos planetas nos levará

³Uma versão virtual da referência [8] está disponível no endereço astro.if.ufrgs.br.

⁴O Stellarium é um programa que simula o céu e sua versão para computador pode ser baixado na página www.stellarium.org, gratuitamente.

⁵A consulta ou impressão das cartas celestes podem ser feitas através dos sites www.cartascelestes.com ou observatorio.guarapari.ifes.edu.br/index.php/planisferio/.

a conclusões naturais como a divisão do céu em constelações, extrapolando o objetivo inicial da prática e alinhando-se com a BNCC na habilidade

EF03CI08 - Observar, identificar e registrar os períodos diários em que o Sol, demais estrelas, Lua e planetas estão visíveis no céu.

J3 - Contribuições de Galileu para a astronomia

Aqui, buscamos a compreensão do processo de evolução do conhecimento científico, no tocante às observações de Galileu e sua contribuição para a astronomia. Nesse sentido, pode-se incentivar a construção de lunetas semelhantes à de Galileu. Alguns modelos podem ser encontrados nos trabalhos [9–11].⁶ Essa etapa vai ao encontro da BNCC na habilidade destacada abaixo:

EF05CI13 - Projetar e construir dispositivos para observação à distância (luneta, periscópio etc.), para observação ampliada de objetos (lupas, microscópios) ou para registro de imagens (máquinas fotográficas) e discutir usos sociais desses dispositivos.

O uso das lunetas, confeccionadas pelos alunos, deve ser incentivado na prática de observação noturna. Em sala de aula, o uso do Stellarium para mostrar as estruturas observadas tanto por Galileu quanto pelos estudantes ajudará no reconhecimento do céu. Nesse momento, vale mostrar que a trajetória dos planetas, como a observamos, está quase sobre o caminho percorrido pelo Sol, a este damos o nome de Eclíptica. Outras curiosidades e problemas dos modelos com órbita circular podem ser levantados, por exemplo, a velocidade orbital variável e o movimento retrógrado dos planetas. De fato, o movimento retrógrado é uma consequência do movimento relativo dos planetas, que apresentam velocidades diferentes em suas órbitas em torno do Sol. Ele pode ser explicado considerando epiciclos nas órbitas circulares, como feito por Copérnico, ou utilizando o modelo de órbitas elípticas, como proposto por Kepler. Esse último simplifica o modelo matemático e descreve as órbitas planetárias de forma precisa.

⁶Uma sugestão de vídeo ensinando a construir a luneta pode ser visto em www.youtube.com/watch?v=quP7pOORCv0.

J4 - Dinâmica planetária

Solicitamos aos alunos que modelassem o movimento planetário observado no Stellarium e verificamos o quão próximo dos modelos aceitos pela ciência eles se aproximaram. Além disso, pode ser um bom momento para trabalhar os modelos geocêntricos e heliocêntricos, chegando até as leis de Kepler e a lei da gravitação universal de Newton. A Ref. [12] pode dar elementos para a discussão.

Devido à relevância das leis de Kepler para esse trabalho, e buscando ampliar a abrangência do que está aqui exposto, optamos por enunciar tais leis, cuja síntese pode ser encontrada em [13], dando o devido destaque a alguns pontos onde os alunos comumente cometem erros.

1ª lei de Kepler - lei das órbitas

A órbita planetária é um elipse, com o Sol ocupando um dos focos. Contudo, o valor da excentricidade dela é muito próximo a zero, o que a aproxima a uma circunferência. Tal característica é mostrada na Tabela (1), a qual traz as excentricidades das órbitas planetárias, e ilustrada na Figura (3). Essas figuras foram obtidas utilizando os valores da excentricidade (e) de cada planeta e a relação desta com os semieixos maior (a) e menor (b), dada por

$$\begin{aligned} a &= c/e \quad e \\ b &= a\sqrt{1 - e^2} \quad , \end{aligned} \quad (1)$$

sendo $2c$ a distância entre os focos da elipse. Dispondo dos valores dados pela relação acima e usando as equações paramétricas da elipse,

$$\begin{aligned} x &= a \cos(t) \quad e \\ y &= b \sin(t) \quad , \end{aligned} \quad (2)$$

teremos a forma das órbitas planetárias como mostrado nas Figuras (3). Vale destacar que as órbitas estão fora de escala e os eixos foram relativizados. Isso facilita a comparação das órbitas e mostra o quão próximas de uma circunferência elas são.

2ª lei de Kepler - lei das áreas

Ao imaginarmos uma linha ligando algum planeta ao Sol, essa linha varrerá áreas iguais em intervalos de tempos iguais, independente da posição desse planeta. Em outras palavras, a velocidade areolar (v_{areolar}) – rapidez com que uma

Tabela 1: Essa tabela mostra o valor da excentricidade da órbita de cada um dos planetas do Sistema Solar, [7].

Planeta	Excentricidade
Mercúrio	0,206
Vênus	0,007
Terra	0,017
Marte	0,093
Júpiter	0,049
Saturno	0,056
Urano	0,046
Netuno	0,011

área é varrida, pela linha imaginária – é constante. Então,

$$v_{\text{areolar}} = \frac{\Delta A}{\Delta t} = \text{constante} \quad , \quad (3)$$

sendo ΔA a variação da área e Δt o intervalo de tempo em que a área é varrida. Portanto, da Figura (4), se o tempo para o planeta ir de A até B (Δt_{AB}) é igual ao tempo que o planeta leva para ir de C até D (Δt_{CD}), então $\Delta A_{AB} = \Delta A_{CD}$.

Contudo, como a órbita mostrada na figura é uma elipse, o tamanho da linha imaginária que liga o Sol ao planeta muda com o tempo. Isso faz com que o espaço linear percorrido pelo planeta não seja o mesmo em intervalos de tempos iguais. Assim, a distância entre os pontos A e B é menor que a distância entre os pontos C e D, $\Delta S_{AB} < \Delta S_{CD}$, uma vez que a linha imaginária cresce quando o planeta se afasta do Sol. Desse modo, a velocidade tangencial próxima ao afélio (ponto 'a', da Figura (4)) é menor que a velocidade próxima ao periélio (ponto 'p', nessa mesma figura). Consequentemente, quando o planeta se aproxima do periélio sua velocidade tangencial deve aumentar, logo ele experimenta, na direção tangencial, um movimento acelerado, já quando se aproximar do afélio experimentará um movimento retardado, na mesma direção.

3ª lei de Kepler - lei do período

Por fim, a razão entre o quadrado do período de translação (T) de algum planeta e o cubo do semieixo maior (a) deste é constante (K), ou seja,

$$\frac{T^2}{a^3} = K \quad . \quad (4)$$

Entretanto, a excentricidade da órbita planetária é próxima a zero, o que faz a se aproximar ao raio

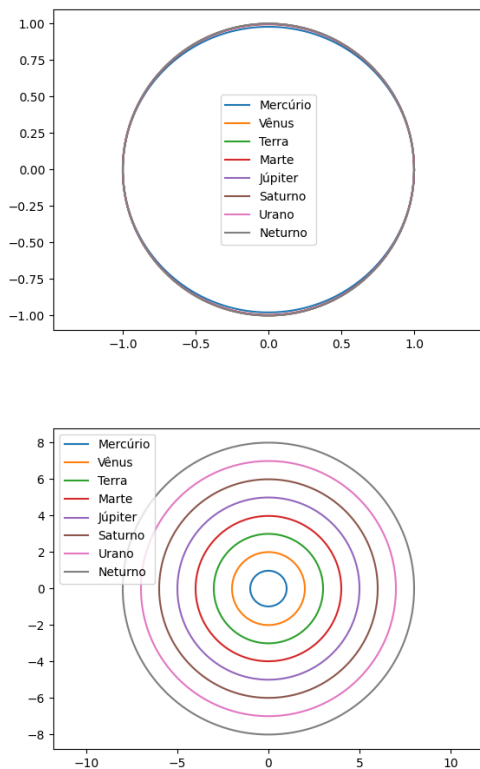


Figura 3: Nessa figura é mostrada uma comparação entre as excentricidades das órbitas planetárias em duas perspectivas. Na superior, as órbitas são apresentadas com o mesmo valor de a , que adotamos igual a unidade. Na figura inferior, tais órbitas foram distanciadas de uma constante. Todas as órbitas são muito próximas a uma circunferência devido ao pequeno valor da excentricidade das elipses representadas.

de uma circunferência.

J5 - Coleta de dados

Uma vez que as leis de Kepler são válidas para qualquer sistema orbitante, pode-se determinar a massa de Júpiter utilizando (4). Como a excentricidade orbital de Io é pequena, algo em torno de 0,0041, podemos aproximar o movimento de revolução desta lua ao redor de Júpiter ao movimento circular uniforme. Isso facilitará a abordagem matemática sem mudar significativamente a massa de Júpiter, determinada pelo estudante.

Sendo assim, como a formulação da lei da gravitação universal de Isaac Newton, que unifica as leis de Kepler, expressa a interação entre dois corpos isolados, de modo que a força de atração gravitacional (F_g) entre eles é diretamente proporcional ao produto das massas (M e m) e inversamente proporcional ao quadrado da distân-

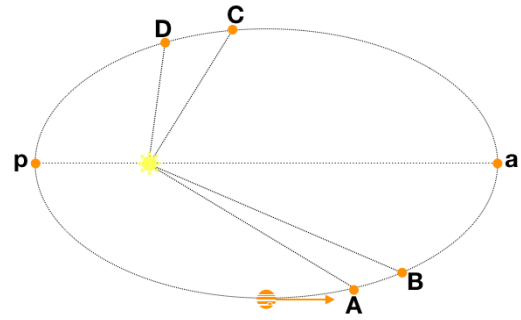


Figura 4: Essa figura é uma representação fora de escala (a excentricidade está muito grande) de uma órbita planetária. Nela estão marcados os pontos de afélio (a) e periélio (p), além de quatro pontos aleatoriamente escolhidos A, B, C e D.

cia (r^2), então

$$F_g = G \frac{Mm}{r^2} \quad , \quad (5)$$

sendo $G = 6,674184 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ uma constante de proporcionalidade, chamada de constante universal da gravitação. No sistema Júpiter-Io, M torna-se a massa do planeta, m a massa de Io e r o raio orbital da lua. Como a única força que atua sobre a lua é a gravitacional, então a força resultante

$$F_R = ma \quad (6)$$

é centrípeta, para um referencial inercial centrado em Júpiter. Desse modo, substituindo a aceleração centrípeta ($a = \omega^2 r$) na equação acima, em que $\omega = 2\pi/T$ é a velocidade angular de Io e T é o período orbital da lua, e desenvolvendo-a temos

$$\frac{T^2}{r^3} = \frac{4\pi^2}{GM} \quad , \quad (7)$$

como enunciado por Kepler em sua terceira lei. Por outro lado, a demonstração do resultado acima quando $M \approx m$ será deixado como desafio, o resultado para esse caso pode ser encontrado em [8]. De todo modo, se conhecermos o período orbital e o raio da órbita de Io, conseguiremos determinar a massa aproximada de Júpiter. Assim, para coletar esses dados utilizamos o aplicativo Stellarium seguindo pois o passo a passo abaixo:

- i) Retiramos os efeitos de atmosfera e de superfície;
- ii) Fixamos o programa para observar apenas Júpiter, visto da Terra. Isso pode ser feito localizando o planeta e clicando sobre ele;

- iii) Aceleramos o tempo até que Io estivesse em uma situação de saída do eclipse e anotamos o instante (data e horário) em que isso ocorre. Tal estudo pode ser realizado no período de um mês, anotando as datas e horários em que Io se encontra nessa situação.
- iv) Configuramos a localização de observação para Júpiter;
- v) Fixamos o programa para observar apenas Io, visto na superfície de Júpiter. Isso pode ser feito localizando a lua e clicando sobre ela;
- vi) Usando a função de data e hora, selecionamos os dias e horários anotados no item iii) e tomamos nota da distância que Io está de um observador, localizado na superfície de Júpiter, em cada uma delas. Vale ressaltar que repetimos esse procedimento até obtermos as distâncias correspondentes a cada instante anotado.

Ao fim da coleta de dados, obtivemos a Tabela (2). Ela nos mostra os dias e horários em que Io está na situação descrita no item iii) e a distância coletada no item vi).

Tabela 2: Essa tabela mostra as horas que Io sai do eclipse, visto da Terra, e as distâncias que a referida lua está de Júpiter.

Data	Hora	Distância (km)
16/06/2020	21:47:14	455640,398
18/06/2020	16:12:17	470879,512
20/06/2020	10:24:17	379215,874
22/06/2020	04:53:25	382994,694
23/06/2020	23:15:34	475846,748
25/06/2020	17:37:47	448806,513
27/06/2020	11:58:15	358118,779
29/06/2020	06:28:45	417394,157
01/07/2020	00:57:54	483537,748
02/07/2020	20:08:07	387340,763
04/07/2020	13:55:20	362064,246
06/07/2020	08:22:40	458900,405
08/07/2020	03:03:03	463288,116
09/07/2020	21:35:39	363872,101
11/07/2020	15:53:50	399555,370
13/07/2020	09:53:39	438333,768
15/07/2020	04:39:48	432320,230

Essa tabela apresenta uma diferença significativa nas distâncias medidas. Tal diferença está

ligada ao tamanho do planeta e a rapidez rotacional dele, já que ao escolhermos um referencial em Júpiter, ele é posto sobre a superfície do planeta, na mesma latitude em que o observador se encontrava na superfície da Terra, e não em seu centro.⁷ Durante a coleta de dados utilizamos dois referenciais: o referencial A está na Terra e observa o eclipse de Io, definido no passo (ii) anterior (este referencial mede os intervalos de tempo), e o referencial B está sobre a superfície de Júpiter medindo as distâncias entre ele e Io, nos instantes estabelecidos por A. Apesar de podermos aproximar a posição de A para o centro da Terra, já que a distância entre a Terra e Júpiter é muito maior que o raio da Terra. O mesmo não pode ser feito para B, ou seja, a distância entre B e Io será influenciada pela rotação de Júpiter, de modo que B se aproxima e se afasta de Io, especialmente porque o observador está localizado numa latitude baixa, próxima ao equador do planeta, causando as mudanças nas distâncias apresentadas na Tabela (2). Note que, se o observador estivesse em um dos polos de Júpiter, não haveria esse efeito de variação da distância produzido pela rotação do planeta.

Quando calculamos a diferença entre os valores máximo e mínimo apresentados, $\approx 1,3 \times 10^5$ km, e comparamos com o diâmetro de Júpiter, $\approx 1,43 \times 10^5$ km, vemos que os valores são muito próximos, evidenciando o que foi exposto acima. Sendo assim, para se obter uma estimativa, aproximada e razoável, da distância entre Io e o centro de Júpiter, uma vez que a latitude influencia no valor obtido para o raio orbital da lua, é necessário calcular a média a partir de uma “grande” quantidade de dados coletados (no nosso caso, durante um mês).

Além disso, durante a coleta de dados foram desconsiderados os movimentos de translação dos planetas (movimento em torno do Sol), ou seja, tratamos o caso onde os dois planetas, Terra e Júpiter, estão em repouso (são referenciais inerciais). Apenas com essa hipótese, os tempos medidos por A correspondem exatamente ao período

⁷Note que foi mudada apenas a localização do observador para o planeta Júpiter. Desse modo, no Stellarium, não alteramos as coordenadas de latitude e longitude, o que coloca o observador em Júpiter na mesma latitude em que estava na Terra. Ou seja, se, originalmente, o observador estava em Guarapari-ES, ele ficará localizado na latitude de cerca de 20 graus ao sul do equador da Terra e também em Júpiter.

sideral de Io.

J6 - Obtendo a massa de Júpiter

A partir dos dados expostos na tabela acima, encontramos o período orbital médio de Io, o qual é

$$\langle T \rangle = (42,5 \pm 0,3) \text{ horas.}$$

Para isso, calculamos a diferença entre dois intervalos de tempo sucessivos. Esse valor obtido depende da velocidade tangencial relativa entre a Terra e Júpiter. Quando Júpiter está em oposição, em 2020 esse fenômeno ocorreu no dia 14 de julho, próximo a data de coleta dos dados, essa diferença de tempo corresponderá, com maior precisão, ao período orbital correto.

Na situação de oposição a velocidade tangencial da Terra é praticamente paralela a velocidade orbital de Júpiter, ou seja, a posição relativa entre os planetas não muda muito entre dois eclipses sucessivos de Io, o que permite obter uma melhor estimativa do período orbital real da lua. Entretanto, se nossos dados fossem coletados quando Júpiter estivesse em uma situação de quadratura, ou seja, para o caso onde as velocidades tangenciais dos planetas em suas órbitas são perpendiculares, o que acontece nas épocas próximas das quadraturas de Júpiter, teríamos um aumento ou diminuição na medida do período orbital de Io, devido à velocidade finita de propagação da Luz. Isso está diretamente relacionado com a primeira determinação quantitativa da velocidade da luz, realizada no século XVII, por Ole Romer.⁸

Do mesmo modo, encontramos que o raio médio da órbita de Io é

$$\langle r \rangle = (42 \pm 4) \times 10^4 \text{ km.}$$

Para calcular o erro dos resultados apresentados acima, utilizamos o cálculo de desvio padrão médio ($\langle \sigma \rangle$),

$$\langle \sigma \rangle = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}{N - 1}}, \quad (8)$$

tal que N é o número de elementos, x_i é o valor da i -ésima grandeza e $\langle x \rangle$, o valor médio desta.

Portanto, substituindo os valores de $\langle T \rangle$ e $\langle r \rangle$ na equação (7), obteremos a massa de Júpiter

$$M_J = (1,9 \pm 0,5) \times 10^{27} \text{ kg},$$

⁸Para maiores detalhes sobre esse fato histórico, consulte https://en.wikipedia.org/wiki/Ole_Rømer.

cujo desvio foi calculado usando a expressão de propagação do erro

$$dX(x_i) = \sum \left(\frac{\partial X}{\partial x_i} \right) dx_i, \quad (9)$$

que ao ser aplicada na equação (7) e desconsiderando os termos de ordem superior, resulta em

$$\left(\frac{\Delta M_J}{M_J} \right)^2 \approx \left(3 \frac{\Delta r}{r} \right)^2 + \left(2 \frac{\Delta T}{T} \right)^2,$$

sendo ΔM_J , Δr e ΔT os erros das grandezas correspondente a M_J , r e T , respectivamente. O valor encontrado para a massa de Júpiter está de acordo com o resultado esperado e apresentado na literatura, algo em torno de $1,898 \times 10^{27}$ kg.

Vale destacar que esse método pode ser utilizado para encontrar a massa de um corpo central, quando for possível obter estimativas do período e do semieixo maior da órbita do corpo menor em torno dele. Uma aplicação bem interessante desse método é o da determinação da massa do buraco negro supermassivo que há no centro da nossa galáxia a partir da observação da órbita de estrelas que estão próximas a ele, como vem sendo feito recentemente.

2.2 As crateras e mares lunares

Quando Galileu apontou o telescópio para a Lua, ele observou que sua superfície apresenta um relevo com montanhas e vales similares aos encontrados na Terra, contrariando a concepção aristotélica do satélite ser perfeitamente esférico. Diante dessas provas observacionais, a noção de que o meio celeste seria perfeito, imutável e eterno não encontra argumentos que possam justificá-lo, e a divisão em mundo sublunar e supralunar é abandonada, já que, contrariando o que se acreditava, as estruturas siderais apresentam imperfeições e estão suscetíveis a mudanças. De fato, a incoerência desse conceito fica ainda mais evidente quando o astrônomo observa as manchas solares, que não possuem uma forma fixa e existência permanente.

Nesse sentido, essa SD tem o intuito de reconhecer as crateras e mares lunares, como instrumento para adquirir algumas das habilidades e competências previstas pela BNCC. Desse modo, seguiremos a linha de raciocínio proposta na seção anterior e dividiremos o percurso nas seguintes metas:

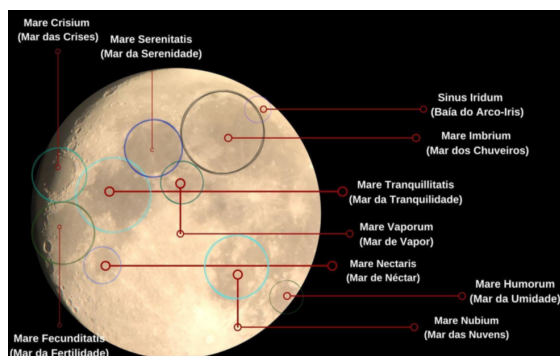


Figura 5: Captura de imagem realizada no dia 13/06/2019 pelo grupo astronômico *See Astronomy*, utilizando um *Smartphone* acoplado ao telescópio Meade ETX-90 e uma lente ocular de 12mm. Nela, destacamos os mares apresentados.

L1 - Observação da Lua

Para a abordagem inicial dessa sequência didática, buscamos incentivar a observação da Lua, feita sem instrumentos astronômicos, com o objetivo de aumentar a interação dos estudantes com a natureza que nos cerca. A partir dessa observação sistemática do astro, algumas conclusões poderão ser tiradas, por exemplo: o atraso de, aproximadamente, 50 (cinquenta) minutos em seu horário de nascimento, quando comparamos dois dias consecutivos, o efeito dela sobre os fluidos da Terra e as manchas escuras em sua superfície. No entanto, com maior tempo observacional, outros detalhes acerca da trajetória lunar poderão ser percebidas, como é o caso da diferença entre os caminhos percorridos pelo Sol e pela Lua, que não são exatamente os mesmos. Cabe frisarmos que, neste caso mais detalhado, poderá haver ainda uma discussão acerca da condição particular para a ocorrência de eclipses, os quais ocorrem apenas quando a Lua está cheia ou nova e o Sol está sobre a linha dos nodos.⁹

Em sala de aula, todos esses aspectos foram discutidos e mostrados utilizando o *Stellarium*. Nesta abordagem com o *software*, escolhendo quatro dias, um para cada fase da Lua, evidenciamos aos alunos a variação da porção iluminada do satélite, uma vez que neste ocorre mudança de área iluminada ao passar dos dias. Da mesma forma, aproveitamos esse momento para compararmos, no planetário virtual, as posições do Sol e da Lua nos dias em que os dois astros estão

⁹A linha dos nodos é uma linha formada pela interseção do plano da órbita da Terra em torno do Sol com o plano da órbita da Lua em torno da Terra [8].

visíveis no céu simultaneamente. Portanto, percebemos a diferença de trajetória entre eles e, a partir daí, fizemos um paralelo deste caso com datas em que o eclipse ocorre. Assim, abordamos duas habilidades previstas pela BNCC:

EF05CI12 - Compreender a periodicidade das fases da Lua;

EF08CI12 - Justificar, por meio da construção de modelos e da observação da Lua no céu, a ocorrência das fases da Lua e dos eclipses, com base nas posições relativas entre Sol, Terra e Lua.

L2 - Astrofotografia e a identificação das crateras e dos mares lunares

Em uma das nossas observações, realizamos capturas de imagens da Lua utilizando equipamentos do Observatório Astronômico do IFES-Guarapari (OAIG). Por intermédio de um *smartphone* acoplado no telescópio Meade LX-90 (12 polegadas), obtivemos as Figuras (5, 6 e 7) que nos possibilitaram, através de comparação com documentos disponíveis,¹⁰ reconhecer e caracterizar 10 (dez) mares e 27 (vinte e sete) crateras da face visível do satélite. Não obstante, é necessário ressaltar que o uso do *Stellarium* é, também, uma ótima ferramenta alternativa para identificar essas características. Este reconhecimento no *software* pode ser feito fixando a observação na Lua e ampliando a imagem para, assim, tais irregularidades ficarem mais evidentes. Nesse sentido, é interessante coletar essas imagens em fases diferentes da Lua para que se consiga observar e identificar um maior número de detalhes, devido ao maior contraste na imagem.

Em primeiro plano, para identificar as irregularidades da superfície lunar, foi abordado, primeiramente, o que seriam os mares lunares. A nomenclatura “Mar” refere-se às manchas escuras visíveis na Lua e foi empregada por Galileu com o seu sentido denotativo, uma vez que este acreditava em uma concreta existência de corpos d’água no astro. No entanto, atualmente, o nome permanece o mesmo, ainda sabendo que os mares lunares são, ao contrário do que se acreditava, planícies basálticas oriundas de um período geologicamente ativo do satélite, onde fissuras em sua

¹⁰Os padrões utilizados para comparação podem ser encontrados em: www.bbc.co.uk/programmes/articles/5h42ZxMX9QW7hRvIVC7RKbn/section-2-bright-and-dark-craters e www.bbc.co.uk/programmes/articles/5gdrKwHtXhRkq0xHDdhqvj/section-1-the-lunar-seas.

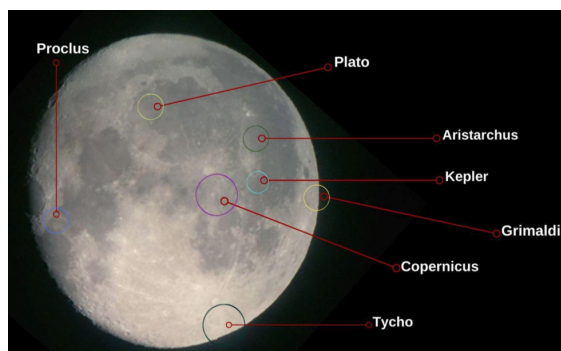


Figura 6: Captura de imagem realizada no dia 14/05/2019, utilizando um *Smartphone* acoplado no telescópio Meade ETX-90 com uma lente ocular 12mm. Nela, destacamos algumas crateras na borda da superfície da Lua e algumas grandes crateras centrais.

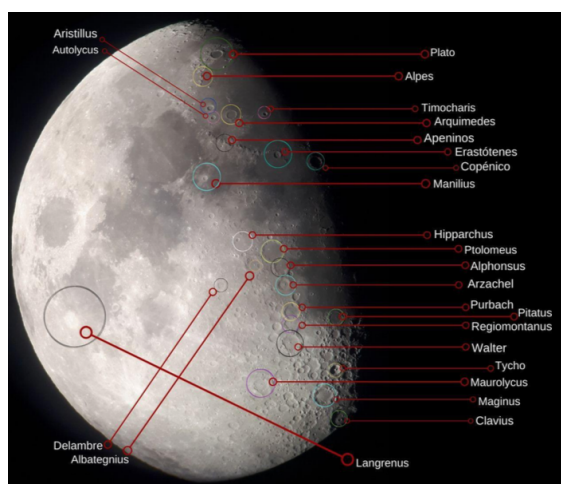


Figura 7: Captura de imagem realizada no dia 09/08/2019, utilizando um *Smartphone* acoplado no telescópio Meade ETX-90 com uma lente ocular 10mm. Aqui, destacamos as crateras mais centrais da superfície lunar. Isso só foi possível devido ao contraste gerado nessa região, consequência de uma porção menos iluminada da Lua.

crosta expeliram lava que se solidificou, deixando-o, portanto, com grandes áreas planas com tonalidades escurecidas. Dessa maneira, para identificar cientificamente estes mares, a União Astronômica Internacional (IAU, do inglês “*International Astronomical Union*”) utiliza neles nomenclaturas que fazem analogias a estados emocionais humanos - como podemos perceber no mar identificando por “tranquilidade” na Figura (5).

Além disso, foi importante fazermos, ainda, um estudo acerca das crateras lunares. Devido à escassa gravidade que o astro apresenta, cerca de $1,62 \text{ m/s}^2$, ou seja, $1/6$ da gravidade terrestre, a colisão de corpos celestes com a superfície lunar, ao longo do tempo, foi o que levou a Lua a apresentar inúmeras deformações basálticas em

sua superfície. Essas crateras, assim como os mares, possuem identificações preestabelecidas pela IAU, entretanto, seguem um critério diferente: são identificadas com nomes os quais homenageiam grandes figuras científicas e filosóficas - como é caso, respectivamente, das crateras Kepler (Johannes Kepler) e Plato (Platão), nas Figuras (6 e 7).

Vale ressaltar, portanto, que esse estudo poderá ser utilizado não só para a identificação das crateras e mares lunares, mas também servirá de base para relacionarmos com outros detalhes e eventos que o astro apresenta. Nesse sentido, podemos abordar as missões espaciais na Lua, por exemplo, localizando o Mar da Tranquilidade, mostrando aos estudantes que foi nessa região em que Neil Alden Armstrong deu “um grande passo para a humanidade”. Além disso, uma abordagem acerca dos movimentos de rotação da Lua (movimento ao redor de um eixo imaginário que passa pelo seu centro) e de revolução dela (movimento que realiza ao redor da Terra) poderão ser relacionados com a visualização parcial do satélite. Isso foi apresentado mostrando a eles que só conseguimos observar mares e crateras lunares em uma das faces do satélite, já que a outra apresenta-se constantemente oculta devido ao sincronismo destes movimentos. Essa etapa se comunica com a habilidade da BNCC

EF04CI11 - Associar os movimentos cíclicos da Lua e da Terra a períodos de tempo regulares e ao uso desse conhecimento para a construção de calendários em diferentes culturas.

2.3 Construindo um diagrama de Hertzsprung-Russell

O poder de resolução de um instrumento óptico está relacionado com sua capacidade de separar as fontes de luz, permitindo que um observador identifique-as de forma clara. Quando isso ocorre, dizemos que este equipamento consegue resolver a imagem. Utilizando-se desse princípio, Galileu conseguiu resolver a imagem de alguns aglomerados de estrelas¹¹ em suas observações, com a luneta.

Quando olhamos para estruturas como a Caixa de Joias (NGC4755), sem o uso de instru-

¹¹Aglomerados de estrelas são estruturas estelares que interagem gravitacionalmente, para maiores detalhes sobre essas estruturas veja https://pt.wikipedia.org/wiki/Aglomerado_estelar.

mentos ópticos, tudo que vemos é um “pontinho luminoso”. A partir desta observação, seríamos levados a concluir que NGC4755 seria mais uma estrela presente no céu. Contudo, se fizermos o uso de um telescópio, semelhante ao de Galileu, por exemplo, veremos que, na verdade, NGC4755 é composto por uma infinidade de pontos luminosos imperceptíveis ao olho humano, devido à proximidade aparente entre eles.

Uma característica interessante dessas estruturas vem do fato de elas terem sido formadas quase no mesmo momento, por isso devem apresentar semelhanças em suas composições químicas. Com o uso da espectroscopia, que consiste no estudo da divisão da luz com o auxílio de uma rede de difração, conseguimos evidências que comprovam tal hipótese, visto que as linhas de absorção detectadas em seus espectros são as mesmas. Outra informação que pode ser obtida analisando o espectro estelar é a determinação da temperatura de uma estrela, que, por sua vez, relaciona-se com o brilho dela. Essa relação foi descoberta independentemente por dois astrônomos, Ejnar Hertzsprung, em 1911, e Henry Norris Russell, em 1913, após observarem que havia um padrão entre as luminosidades e as temperaturas superficiais das estrelas, desenvolvendo, a partir desta, o diagrama H-R. Este mostra uma relação entre a magnitude absoluta (ou luminosidade), que é um indicativo do brilho da estrela, e o tipo espectral, que está ligado à temperatura superficial desses astros.

Assim, ao obtermos esta relação, poderemos fazer um estudo acerca do ciclo evolutivo e classificação estelar. Dessa maneira, elaboramos uma prática que buscou obter o Diagrama H-R de um conjunto de estrelas. A fim de atingirmos este propósito, seguimos a estratégia aplicada anteriormente, determinando os seguintes objetivos parciais:

D1 - Reconhecendo as constelações zodiacais

Iniciamos esse reconhecimento construindo um mapa estelar, ou planisfério celeste,¹² o qual é utilizado comumente para localizar estruturas astronômicas, tais como: estrelas, planetas e chuvas de meteoros. Nesse sentido, aproveitamos essa

¹²Moldes do planisfério celeste, para diferentes latitudes, podem ser encontrado no link www.if.ufrgs.br/~fativa/planisferio/celeste/planisferio.html.

atividade para percebermos a relação entre a posição de um observador no globo terrestre e o céu observado por ele, permitindo verificar alterações nas constelações observadas quando se muda a latitude. Cabe entender, a princípio, que essa mudança ocorre devido à alteração da porção visível da esfera celeste, a qual está limitada pelo plano tangente à posição do observador. Contudo, quando mudamos a longitude de observação, apenas o horário que o astro nasce ou se põe muda, pois não ocorre mudança na altura do polo celeste, apenas o sentido de rotação da Terra que é de oeste para leste, faria com que o horário de nascimento e ocaso fossem diferentes.

Por outro lado, as constelações observadas dependem também da posição da Terra com relação ao Sol. Nesse sentido, o movimento de translação muda o céu observado, já que, se o conjunto de estrelas estiver atrás do Sol, não o observaremos. Isso pode ser entendido utilizando o Stellarium, mudando-se os meses e fixando o horário de observação.

Ainda, utilizando o simulador de céu, mostramos o caminho percorrido pelo Sol ou, de outra forma, as 13 (treze) constelações do zodíaco pelas quais nossa estrela passa ao longo do ano. Para tal, tiramos o efeito tanto da atmosfera quanto da superfície e, em seguida, fixamos a observação no Sol e utilizamos a função data para avançar os dias.

Com base no exposto acima, e tendo em mente que a posição relativa do planeta com relação ao Sol determina as regiões da Terra que recebem maior ou menor incidência dos raios solares, podemos relacionar as constelações observadas à noite com a época de calor ou frio, ou seja, cria-se uma relação entre as estações do ano e as estrelas observadas no céu. A qual nos permite, inclusive, fazer previsões de quando uma das estações vai ocorrer.

Durante a execução desta etapa, trabalhamos as seguintes habilidades previstas pela BNCC:

EF05CI10 - Identificar algumas constelações no céu e os períodos do ano em que elas são visíveis;

EF05CI11 - Associar o movimento diário do Sol e das demais estrelas no céu ao movimento de rotação da Terra;

EF08CI13 - Representar os movimentos de rotação e translação da Terra e analisar o papel da inclinação do eixo de rotação da Terra em relação

à sua órbita na ocorrência das estações do ano, com a utilização de modelos tridimensionais.

D2 - Coleta de dados e construindo o diagrama H-R

Após um primeiro contato com as constelações, tido durante a atividade anterior, iniciamos a coleta de dados, que se alinha com o reconhecimento do céu e nos permite um aprofundamento das habilidades supracitadas. Assim, aproveitando esta temática, verificamos que as estrelas de uma constelação não apresentam nenhum tipo de interação. Elas estão aparentemente próximas devido à nossa limitação em perceber a diferença de profundidade entre as estrelas que compõe uma constelação. Portanto, temos a impressão de que todas as estrelas do céu ocupam a mesma casca esférica, ou seja, estão a uma mesma distância de nós.

Consequentemente, isso nos leva a uma questão alinhada com a obtenção do diagrama H-R: se, hipoteticamente, todas as estrelas estivessem a uma mesma distância de nós, como as veríamos? A grandeza que expressa a hipótese acima é a magnitude absoluta, ou, de outra forma, o brilho observado por nós se todas as estrelas estivessem a uma distância de 10 pc (dez parsec).¹³

Sabendo que a relação entre a magnitude absoluta M e a luminosidade da estrela L é dada por:

$$M = C' - 2,5 \log L + 5 \quad ,$$

sendo C' uma constante que depende dos ajustes de escala, concluímos que quanto maior a magnitude absoluta da estrela, menor deve ser a luminosidade dela. Para maiores detalhes sobre como foi obtida a relação acima, veja a referência [14].

Como estávamos interessados em obter a relação entre a luminosidade (ou magnitude absoluta, pela equação acima) e a temperatura (obtida via tipo espectral ou índice de cor B-V), iniciamos, então, a coleta desses dados com auxílio do Stellarium. Ademais, coletamos informações como a distância das estrelas e suas identificações de acordo com o Catálogo Hipparcos,¹⁴ com a finalidade de ampliar o conhecimento e reafirmar a abordagem acima. Sendo assim:

- i) Escolhemos um conjunto de constelações, dando preferência às do zodíaco e outras

mais conhecidas, como Órion, Cruzeiro do Sul, Centauro e Cão Maior;

- ii) Elaboramos uma listagem de controle, de modo que o maior número possível de constelações tivessem suas informações coletadas;
- iii) Criamos uma tabela compartilhada, de modo que todos os colaboradores pudessem lançar os dados simultaneamente;
- iv) Identificamos as constelações no Stellarium e anotamos os dados das estrelas mais brilhantes, as que formam sua figura.
- v) Plotamos os pontos em um plano cartesiano, tal que o Tipo Espectral e a Magnitude Absoluta correspondam aos eixos X e Y, respectivamente. Para isso, utilizamos a seguinte correspondência numérica para os tipos espectrais: O=10, B=20, A=30, F=40, G=50, K=60 e M=70. Desse modo, um conjunto de estrelas com os tipos espectrais A2, B6, M0 e K5.5, por exemplo, assumem os valores de 32, 26, 70 e 65.5, respectivamente, dentro dessa definição.

Com base nisso, o resultado mais provável obtido usando os dados coletados será algo como mostra a Figura (8). Ou seja, nenhuma relação entre a magnitude absoluta e a classe espectral será observada. Por outro lado, quando limitamos a coleta de dados para estrelas próximas, distâncias menores que 5 pc, encontramos a curva mostrada na Figura (9).

Neste caso, as estrelas apresentam uma tendência a ocupar uma região muito particular nesse diagrama, chamada de sequência principal. Vale destacar que este diagrama permite determinar o estágio evolutivo que se encontra a estrela. No caso particular apresentado na figura, onde as estrelas estão na sequência principal, é permitido concluir que a estrela mantém sua estrutura devido ao equilíbrio hidrostático entre a força gerada pela pressão do gás/plasma¹⁵ e a força gravitacional. Outra evidência que pode ser comprovada quando aumentamos a quantidade de dados coletados é que a maioria das estrelas vistas à noite se encontram neste local do gráfico.

¹³ 1 pc = 206265 UA e 1 UA \approx 1,5 \times 10¹¹ m

¹⁴ O Catálogo Hipparcos pode ser encontrado em www.cosmos.esa.int/web/hipparcos.

¹⁵ Para maiores detalhes sobre a relevância da pressão do plasma no equilíbrio hidrostático acesse <http://astro.if.ufrgs.br/evol/node13.htm>.

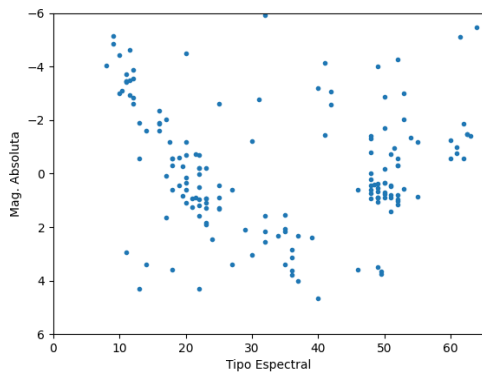


Figura 8: Diagrama H-R construído com todos os dados. Observe que há uma grande dispersão dos dados.

3 Conclusão

A deficitária formação dos profissionais que trabalham com a temática de astronomia no ensino básico pode trazer prejuízos à formação intelectual dos estudantes, nos tópicos previstos pela BNCC. Sendo assim, torna-se necessário ampliar o apoio técnico para que o conhecimento seja transmitido de forma mais adequada. Uma alternativa a essa problemática é a formação continuada que tem sido implementada, como [10,15,16]. Nesse sentido, buscamos construir três sequências didáticas que podem ser aplicadas tanto nos espaços formais quanto nos não formais de ensino utilizando o Stellarium, as quais se alinham com as habilidades da BNCC e com os planos de trabalho dos bolsistas de IC-Jr do OAIG. Embora essa SD esteja majoritariamente voltada à educação básica e, por isso, tende a se comunicar com os currículos desse nível de ensino, ela pode ser ajustada para atender, até mesmo, alunos de graduação.

Isso permitiu que cada bolsista pudesse atingir os objetivos previstos em suas pesquisas e, ainda, elaborar três práticas didáticas: determinação da massa de Júpiter, identificação dos mares e crateras lunares, além da construção de um diagrama H-R. Por conseguinte, a aplicação dessas práticas permitiu que trabalhássemos algumas habilidades da BNCC, tais como: o reconhecimento de algumas estruturas celestes, as condições para ocorrência de eclipses, os efeitos dos astros sobre a Terra, a relação entre a luminosidade e o tipo espectral, bem como a aplicabilidade da gravitação newtoniana para obtenção da massa de Júpiter. Paralelamente, a construção do diagrama H-R mostrou ao estudante que a seleção dos dados

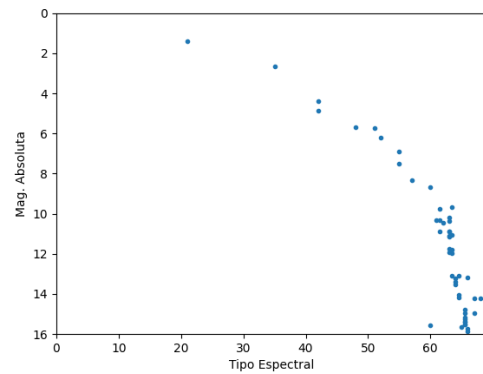


Figura 9: Diagrama H-R construído com todos os dados de estrelas cujas distâncias são inferiores a 5pc. Observe que as estrelas estão na sequência principal.

coletados é um fator importante na experimentação. Sendo assim, as três temáticas aproximam o aluno do conhecimento científico e propõem uma interação com a natureza, levando-os a resultados satisfatórios, uma vez que a massa de Júpiter obtida foi de $M_J = (1,9 \pm 0,5) \times 10^{27}$ kg, as fotos da Lua permitiram o reconhecimento de um número razoável de crateras e mares lunares, e conseguimos obter o diagrama H-R para um conjunto de estrelas que estão a menos de 5 pc de distância, como mostrado na Figura (9). Contudo, ainda podemos pensar em outras problemáticas, alinhadas a esta SD, que podem ser trabalhadas futuramente, tais como: (i) a determinação da velocidade da luz, a partir da diferença no tempo medido para a duração do eclipse de Io quando a Terra está mais próxima de Júpiter e quando ela está mais afastada do planeta e (ii) a obtenção do diagrama H-R para estrelas mais distantes.

O uso destas sequências didáticas se mostrou um grande aliado na tratativa da temática proposta, trazendo como ponto positivo o respeito ao tempo de aprendizagem de cada aluno, permitindo-lhe o empoderamento do conhecimento, tornando-o um agente ativo e protagonista do processo ensino-aprendizagem. Um dos fatores que comprovam tal conjuntura é a perceptível evolução na segurança em discutir as temáticas aqui apresentadas, bem como na capacidade de conduzir as intervenções com os visitantes do OAIG, possibilitando o exercício do protagonismo estudantil.

4 Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES pelo financiamento do projeto, ao IFES e CNPq pelo apoio com bolsas, ao Cosmo-ufes e UFMG pelo apoio técnico e aos alunos de ensino médio ligados ao Observatório Astronômico do IFES-Guarapari, que ajudaram com a coleta de dados e discussões.

Sobre os autores

Adriano Mesquita Oliveira (adriano.oliveira@ifes.edu.br) é doutor em física pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e: *i*) atua como professor de física do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES-Guarapari), onde ministra aulas para os ensinos médio e superior; *ii*) coordena o Observatório Astronômico do IFES Guarapari (OAIG) e o curso de Formação Continuada para Professores do Ensino Fundamental; *iii*) está como diretor da Diretoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão o IFES Guarapari e *iv*) faz parte da equipe executora da Mostra de Astronomia do ES e Encontro de Astronomia do ES.

Cibele Kemeicik (cikemeicik@gmail.com) é mestranda do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física do Instituto Federal do Espírito Santo (PPEFis) e atua como professora da rede municipal de Guarapari e Anchieta, onde ministra aulas de ciências.

Augusto C. T. Monteiro (augusto.monteiro@ifes.edu.br) é mestre em matemática pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e professor de matemática do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES-Guarapari), onde ministra aulas para os ensinos médio e superior. Além disso, é o vice-coordenador do OAIG e do curso de Formação Continuada para Professores do Ensino Fundamental e está como Coordenador de Extensão do IFES Guarapari.

Thalita S. Benincá (thalitasartoribeninca@gmail.com) é aluna do terceiro ano do Curso Técnico, Integrado ao Ensino Médio, em Administração e atua como monitora do OAIG.

Carlos Daniel da S. Mattos (carlosdanieldasilva703@gmail.com) é aluno do terceiro ano do Curso Técnico, Integrado ao Ensino Médio, em Administração e atua como monitor do OAIG.

Guilherme L. Schmidt (guilherme220403@hotmail.com) é aluno do terceiro ano do Curso Técnico, Integrado ao Ensino Médio, em Mecânica e

atua como monitor do OAIG.

Referências

- [1] Brasil, Ministério da Educação, *Base Nacional Comum Curricular*, Brasília, 2018.
- [2] Brasil, Ministério da Educação, *Programa Nacional de Educação*, Brasília, 2015.
- [3] Brasil, Ministério da Educação, *Lei de Diretrizes e Bases Nacional para a Educação*, Brasília, 1996.
- [4] A.M.P. Carvalho, *Fundamentos teóricos e metodológicos do ensino por investigação*, Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências **18**(3), 765–794 (2018).
- [5] A. Koyré, *Do mundo fechado ao universo infinito* (Gradiva, São Paulo, 1986).
- [6] R. R. Cuzinato, E. M. Morais, C. Souza, *As observações galileanas dos planetas mediceanos de Júpiter e a equivalência do MHS e do MCU*, Revista Brasileira de Ensino de Física **36**(3), 1–15 (2014).
- [7] K. R. Madejsky, *Curso básico de astrofísica e cosmologia: 1-O sistema solar, as estrelas e a Via Láctea*, (UEFS Editora, Feira de Santana, 2014).
- [8] K. S. Oliveira Filho, M. F. O. Saraiva, *Astronomia e astrofísica*, (Livraria da Física, São Paulo, 2004).
- [9] R. M. Oliveira et al. *Luneta Galileana construída com lente de óculos*, Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão **2**(1), n.p. (2010).
- [10] M. S. Cardoso, R. C. Ferreira, M. O. Florêncio, *Luneta buscadora artesanal*, disponível em mesonpi.cat.cbpf.br/_escola2019/downloads/notasDeAula/Mateus%20dos%20Santos%20Cardoso.pdf (acessado em 06 jul. 2020).
- [11] C. B. Silveira, *Construção de uma luneta de baixo custo para o ensino de ótica e de astronomia*, disponível em www.if.ufrgs.br/~mittmann/apresentacao_mostra_ifrs_2011_luneta.pdf (acessado em 06 jul. 2020).

- [12] A. Rooney, *A História da Física: da filosofia ao enigma da matéria negra* (M.Books, São Paulo, 2013).
- [13] M. A. Garms, I. L. Caldas, *Síntese das leis de Kepler*, Revista Brasileira de Ensino de Física **40**(2), e2316 (2018).
- [14] N. F. Comins; W. J. Kaufmann III, *Descobrimo o Universo* (Bookman, Porto Alegre, 2010).
- [15] R. C. Bartelmebs et al, *Ensino de astronomia nos anos iniciais do ensino fundamental: como evoluem os conhecimentos dos professores a partir do estudo das ideias dos alunos em um curso de extensão baseado no modelo de investigação na escola*, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (2016), disponível em tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/6809 (acessado em 06 jul. 2020).
- [16] R. Langhi, F. A. Oliveira, J. Vilaça, *Formação reflexiva de professores em Astronomia: indicadores que contribuem no processo*, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **35**(2), 461–477 (2018).
- [17] A. M. Oliveira, C. Kemeicik, A. C. T. Monteiro, R. C. Nascimento, P. Santos, *Continuing education: a solution proposal for problems in the teaching of Astronomy*, arXiv: 2002.05444 (2020).

Astrologia e astronomia: os paralelos entre a crença e a ciência

Julia Cipriano Agrizzi, Izabela Luiza Barossi, Letícia Damasceno Loureiro,
Liviane Sousa Correa e Aline Costalonga Gama

Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória

Resumo

Os questionamentos são marcos na trajetória da humanidade que influenciaram na constante busca em compreender os fenômenos e os mistérios do mundo. Nas mais diversas civilizações, as sociedades utilizavam da observação acerca das periodicidades dos astros para sobreviverem no meio ambiente. No entanto, com base no pensamento da época, as interferências astrais nos fenômenos naturais eram averiguadas de forma transcendental, legitimando, assim, culturalmente, a astrologia. Entretanto, por meio dos conhecimentos atuais, é possível afirmar que a astrologia constitui uma crença, antagônica à astronomia, ciência submetida à lógica racional. Com a experimentação colocada como parte essencial da ciência, o método científico se edifica, e a astrologia se torna uma superstição, refutada pelas novas descobertas científicas, tais como a lei da gravitação universal e o movimento de precessão da Terra. O presente trabalho tem como objetivo afirmar que a astrologia não é, cientificamente, verdade, a partir dos resultados de uma pesquisa realizada com 102 pessoas sobre a possível existência de uma correlação entre as fases da Lua e o nascimento dos entrevistados. Além disso, será descrito, ao longo do trabalho, como os astros verdadeiramente têm influência na Terra. Hoje, como consequência da intensificação da pós-verdade em argumentos infundados e incoerentes, a ciência tem sido negligenciada, acarretando um grande retrocesso social. Assim, essa simples pesquisa, realizada com propósitos educacionais, revela a importância do debate e da reflexão crítica acerca das informações que recebemos.

Abstract

The questionings are milestones in the course of humanity that influenced the constant search to comprehend the phenomena and the mysteries of the world. In the various civilizations, societies used the observation about the periodicities of the celestial bodies to survive in nature. However, based on the thoughts of that time, the astral influence in the natural phenomena was analysed in a transcendental way, legitimizing, thus, culturally, the astrology. In spite of that, by means of the current knowledge, it is possible to attest that astrology constitutes a belief, antagonistic to the astronomy, a science submitted to a rational logic. As well as the experimentation is considered as an essential part of the science, the scientific method got built and, then, astrology became a superstition, refuted by the new scientific discoveries, such as the law of universal gravitation and the Earth's movement of precession. This present article intends to affirm that astrology is, scientifically, not true by the results of a research carried out with 102 people about the possible existence of a correlation between the phases of the Moon and the birth of the interviewees. Besides this, it will be described, along this essay, how the heavenly bodies really have influence on Earth. Nowadays, as a consequence of the intensification of the post-truth, with the dissemination of unfounded and incoherent arguments, science has been neglected, causing a great social setback. Along these lines, this simple research, realized on educational purposes, reveals the importance of the debate and critical reflection about the information that we receive.

Palavras-chave: astronomia, astrologia, divulgação científica.

Keywords: astronomy, astrology, science communication.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31718](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31718)

1 Introdução

Giordano Bruno, filósofo e matemático do século XVI, morto pela Inquisição, em 1600, além de defender a existência de outros sistemas planetários, os quais poderiam abrigar diferentes formas de vida, foi um dos defensores da teoria heliocêntrica. É indiscutível que essa, considerada antigamente heresia, hoje é lida como verdade. Contudo, provar que a Terra não é centro do universo, nem tão pouco está só, foi um trabalho árduo e fundamentado pelo método científico [1].

Toda teoria científica, tal como o heliocentrismo, parte de uma observação, que, por si só, não é suficiente. Galileu Galilei, um dos responsáveis pela comprovação do heliocentrismo, dissertou sobre o método científico, instrumento necessário para comprovar se algo é ou não ciência [2]. Essa lógica, é o argumento principal para provar que astrologia não é uma ciência, tema abordado no presente artigo.

Nesse contexto, é necessário entender do que se trata a astrologia. Essa pseudociência, argumenta que a posição dos corpos celestes, no momento do nascimento de uma pessoa, é responsável pela personalidade que esse indivíduo terá, além de prover informação sobre as relações humanas [3].

Defendendo a ciência como fonte de conhecimento, com o propósito de debater e desmistificar crenças, sem embasamento científico, este trabalho busca salientar as consequências da astrologia e das inverossímeis informações a respeito da astronomia, ciência que de fato estuda os astros.

Deste modo, o trabalho aqui exposto, tem como objetivo afirmar que astrologia é uma pseudociência, além de expor como os astros têm, verdadeiramente, influência na Terra. Para isso, serão apresentados dados comprovados cientificamente e uma pesquisa realizada com 102 pessoas, a fim de contestar uma certa crença de que os bebês costumam nascer durante a fase de Lua cheia.

2 O estudo dos astros

O domínio sobre o movimento dos astros não é recente. Babilônios, assírios, egípcios e chineses foram responsáveis pelos primeiros registros astronômicos, datados de aproximadamente 3000 a.C. Desde o seu surgimento, devido à periodicidade do movimento dos astros, a astronomia foi

utilizada como tecnologia para auxiliar o ser humano.

O movimento que a Terra faz ao redor do Sol, associado à inclinação do eixo de rotação da Terra, determina as estações do ano. Essa, por sua vez, influencia nas diferentes extremidades da Terra, como, por exemplo, nas plantas locais, nos hábitos dos animais e até na cultural da sociedade. Conhecendo precisamente o início das estações do ano, torna possível o planejamento de plantios e colheitas.

Um grande exemplo da influência dos corpos celestes na Terra vem do Egito Antigo. Essa sociedade – chamada de civilização hidráulica, isto é, que viviam suas organizações sociais baseadas nos benefícios que as margens de um grande rio ofereciam – tinham previsões das cheias do Rio Nilo através da observação do céu e dos corpos nele presente [4].

Provocando as chamadas marés, a Lua, satélite natural da Terra, é um dos principais astros que tem influência física na Terra. Esse fenômeno se dá pela força gravitacional que o astro exerce na Terra e a noção de que a Lua influencia as marés não é recente, sendo que os povos antigos utilizavam esse conhecimento para a navegação [4].

3 O cosmos sob a óptica aristotélica

Aristóteles, extraordinário filósofo da Grécia Antiga, nascido em 384 a.C., através da importância dada por ele ao conhecimento empírico e às suas classificações sistemáticas do conhecimento, influenciou as ciências modernas que surgiram a partir do século XVI. A ciência proposta por Aristóteles, estritamente ligada ao seu pensamento filosófico, com teorias formuladas, basicamente, através do método da observação, perdurou por séculos como principal conhecimento sistemático sobre os fenômenos naturais, os astros e o Universo como um todo. A cosmologia aristotélica, desenvolvida a partir da contemplação do céu, levantava hipóteses sobre a composição dos astros, o movimento realizado por aqueles corpos e a localização desses em meio a um Universo finito, o qual ele acreditava que possuiria o próprio planeta Terra como seu centro estático [5].

Para ele, o cosmos era estruturado a partir de uma noção de ordem, na qual os corpos se posicionavam conforme a natureza de sua composição. Os elementos mais pesados, densos, como a

terra e a água, teriam a tendência de se concentrarem no centro do espaço, enquanto o ar formaria uma camada em torno desses aglomerados de matéria. Junto dessa ordem, Aristóteles apontava uma distinção entre a matéria terrestre e o éter, nome designado à substância que constituiria os astros, inicialmente chamados corpos celestes. Aplicando um conceito de valor aos objetos que examinava, afirmava que esses corpos eram imutáveis, perfeitos e incorruptíveis, uma vez que o céu sempre parecia o mesmo, inalterado, aos observadores da época, enquanto os elementos na Terra sofriam constantes transformações. Desse modo, Aristóteles não possuía nada além de preceitos qualitativos para descrever os fenômenos universais, premissas essas que não foram suficientes para explicar as questões que surgiam ao longo do tempo [5].

Somente no século XVI, com a separação do pensamento dogmático religioso e do pensamento científico, Nicolau Copérnico, defendendo um modelo heliocêntrico, promove uma mudança de paradigma. A revolução copernicana contribuiu para uma transformação da ciência e do saber e, é nesse cenário de inovações, que surgem figuras como Giordano Bruno e Galileu Galilei.

4 O método galileano e a sistematização da ciência

Como uma das mais importantes personagens da revolução científica, e precursor da ciência moderna, Galileu Galilei empenhou-se nas análises quantitativas dos fenômenos, contribuindo, desse modo, para a descrição matemática dos eventos. Seus esforços, na introdução do experimentalismo e na esquematização da ciência, conferem a Galileu tamanha relevância no meio científico [5].

Reconhecendo que a única forma de produzir o conhecimento de forma segura e precisa seria por meio da determinação de uma metodologia para o exercício da investigação científica, ele contribuiu para o desenvolvimento de uma nova epistemologia. Por esse motivo, muitos autores cogitam se Galileu poderia ser considerado, além de cientista, um filósofo, à medida em que ele comprometeu seus trabalhos e sua obra à sistematização da ciência [6].

A epistemologia trata da análise sobre o que é o conhecimento, a forma como ele é obtido e justificado, suas fontes, seus limites, como as crenças

se relacionam ao conhecimento e, a questão mais importante para esse artigo, o que é a ciência. As áreas que apoiam a epistemologia são o racionalismo, o empirismo e o construtivismo [7]. A partir da aplicação desses três ideais, Galileu construiu um método de investigação que incluía demonstrações e experimentos, além observação, a fim de concluir teorias que atendessem de modo universal à descrição dos fenômenos. Desse modo, com o emprego da lógica, a silogística aristotélica, e as evidências provenientes de seus ensaios, Galilei concedeu à ciência uma enorme confiabilidade, o que pode ser verificado nos avanços nas áreas da física, química e medicina, por exemplo. Assim, a ciência foi elevada à posição mais prestigiada dentro da hierarquia dos conhecimentos, circunstância essa que ressalta a importância da construção de discursos racionais para explicar os eventos que ocorrem na natureza [6].

Galilei também se dedicou ao aprimoramento de lentes e telescópios, que permitiram uma observação mais detalhada dos astros no céu e, após a divulgação de seus estudos, o cosmos geocêntrico e as explicações aristotélicas caíram por terra. O lançamento de sua obra *Sidereus nuncius* (“Mensageiro das estrelas”) causou um grande impacto na sociedade científica da época, pois contestava o conhecimento do universo até então. Com o sucesso de suas ferramentas, Galileu impulsionou a evolução dos instrumentos técnicos aplicados à produção da ciência, e seus trabalhos culminaram nos telescópios atuais [8].

5 A astrologia e o seu discurso irracional

A organização social das antigas civilizações era estruturada com base na espiritualidade, de modo que as influências astrais nos fenômenos da natureza eram averiguadas de forma transcendental. O calendário zodiacal, onde os signos presentes representam, em sua essência metafísica, figuras místicas e os mapeamentos astrológicos, consiste de superstições sobre destino e personalidade, fundamentadas conforme a representação gráfica do céu no exato momento do nascimento de um indivíduo [9].

Contestando fortemente os princípios da astrologia, o movimento de precessão da Terra, estabelecido por Jean Richer no século XVII, evidencia a mudança do eixo de rotação da Terra, não permitindo aos polos celestes se posicionem fixa-

mente no céu a cada ano [10]. Por essa perspectiva, o padrão de formatos das constelações, seguido pelos signos em suas respectivas datas, torna-se inconsistente e perde sua validade.

Além disso, avanços científicos relacionados às teorias gravitacionais, de Newton a Einstein, torna possível afirmar que o efeito dos astros nas pessoas, tal como sugerido na astrologia, não possui lógica. Por exemplo, no momento do parto, mesmo que a massa de um planeta seja muito maior que a do obstetra, a distância se mantém discrepante, logo, o efeito de maré do obstetra sobre a criança é maior que o de um planeta. Além disso, é considerado pela astrologia que o efeito exercido pelos planetas independe de sua exata distância da Terra, alheio as comprovações científicas de que a força de atração mútua é proporcional a massa dos corpos e inversamente proporcional ao quadrado da distância que separa seus centros de gravidade [3].

Sendo assim, é possível afirmar que a astrologia se constrói somente como um discurso irracional, antagonico à ciência astronômica, pois não parte de uma lógica submetida à razão, e não há justificativas criadas para prová-la a partir de um método científico [11].

6 A verdadeira influência psicossocial dos astros na vida humana

Uma pesquisa da Fundação Nacional de Ciência dos EUA mostra que, em 2012, metade da população americana acreditava que a astrologia tinha base científica, o que explicaria o aumento na procura por mapas astrais e consultas à astrólogos. A crença de que o movimento dos astros influenciava não só a vida das pessoas, como poderiam prever o futuro, se tornou cada vez maior [12].

Em seu trabalho, Romanzoti apresenta a visão crítica sobre a crença nessa pseudociência e o enfoque dado a sua divulgação para o público feminino [13]. Exibe o pensamento da socióloga Julia Hemphill, da Universidade de York (Canadá), que afirma que a astrologia é uma teoria da ciência que não é experienciada, imposta às mulheres, para que acreditem, como uma forma de compreender seus pensamentos, o mundo e seus destinos. Destaca que a maioria das revistas, destinadas ao público feminino, apresentam uma seção sobre horóscopo e signos, para que as mulheres

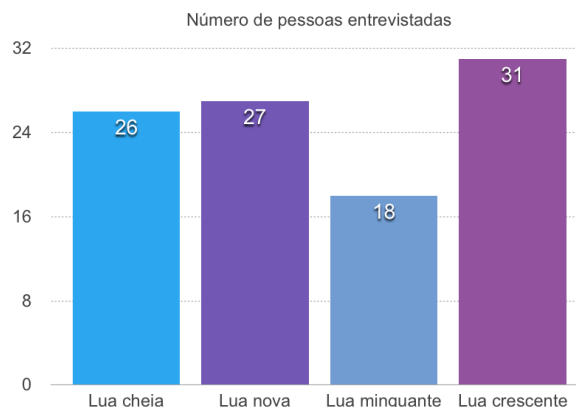


Figura 1: Gráfico com a fase da Lua ocorrida na data do nascimento dos entrevistados.

recebam, de forma acelerada, informações sobre pseudociências, levando-as a acreditar na influência dos astros. Essas ideias possibilitam a formação de um pensamento acrítico sobre as situações vivenciadas por elas, que são induzidas a acreditar, sem questionar, em coisas não reais, sem base científica.

Essa indução sugestiona personalidades, comportamentos e decisões, sem qualquer fundamentação lógica, o que, por vezes, poderia relegar as mulheres a um local inferior no debate social ou, até mesmo, afastá-las da comunidade acadêmica. Assim, é relevante não apenas a valorização do pensamento científico relacionado à astronomia, mas também, a profunda crítica às possíveis distorções de gênero ocasionadas pela astrologia.

7 A influência da Lua nos partos é real?

Nos dias atuais, ainda há uma crença, por parte de muitas pessoas, de que mais bebês nascem no período de Lua cheia. Esta crença tem base no passado distante, onde os romanos acreditavam que a Lua influenciava a mente das pessoas, e, devido à correspondência com o ciclo menstrual das mulheres, eles ligaram o ciclo lunar à fertilidade das mulheres. Além disso, os romanos acreditavam ainda que, assim como a Lua tinha influência sobre as Marés, da mesma forma, poderia influenciar nos líquidos corporais [14].

Buscando investigar esse fato, realizamos uma pesquisa, através de um formulário, coletando dados do dia e horário de nascimento de 102 pessoas, de idades distintas. A Figura 1 ilustra os resultados encontrados.

Observamos no Gráfico apresentado na Figura 1 que, não há uma predominância de nascimento em uma fase específica. Assim, é possível inferir que a crença de que há um maior número de partos na Lua cheia não se fundamenta em fatos comprovados cientificamente, visto que a maioria das pessoas entrevistadas nasceram, na verdade, durante outras fases da Lua, sendo que 25% dos resultados representam os indivíduos que nasceram no período de Lua cheia.

8 Considerações finais

Infelizmente, mesmo com todos os avanços que a ciência tem proporcionado, os discursos irracionais têm se intensificado nos últimos tempos, principalmente com o uso da *internet*, e, então, o conhecimento científico é frequentemente contestado por argumentos infundados e incoerentes. Nesse cenário, entram em ascensão, por exemplo, os movimentos antivacinas e terraplanistas, entre outras teorias da conspiração.

Assim, a promoção dessas ideias sem embasamento lógico representa um enorme retrocesso e um significativo desrespeito à comunidade científica. Tais discursos, além de colaborarem para a alienação das pessoas, que são manipuladas por essas falsas informações, induzem à ignorância e até mesmo à intolerância social. Essa simples pesquisa, realizada com propósitos educacionais, revela a importância do debate e da reflexão crítica acerca das informações que recebemos. Por isso, sugerimos que seja aplicada, em sala de aula, uma abordagem criteriosa sobre outros temas relacionados à astronomia, principalmente pertinentes à evolução do conhecimento dessa ciência, de modo que possamos produzir uma formação científica nas crianças e adolescentes, contribuindo, assim, para o desenvolvimento de uma sociedade questionadora.

O questionário realizado sobre a data de nascimento dos entrevistados e as fases da Lua pode ser ampliado através do desenvolvimento de novas pesquisas, expandindo o tema em questão e aumentando a amostragem de dados, com a finalidade de atestar estatisticamente a não-correlação entre a fase da Lua cheia e o nascimento dos bebês.

Sobre as autoras

Aline Costalonga Gama (agama@ifes.edu.br) é a professora orientadora desse trabalho, mestre em física pela UFES e integrante da Coordenação de Física do IFES - Campus Vitória.

Julia Cipriano Agrizzi (juliaciprianoagrizzi@gmail.com), Izabela Luiza Barossi (izabelalbs129@gmail.com), Letícia Damasceno Loureiro (leticialoureiro01@hotmail.com) e Líviane Sousa Correa (livialoc588@gmail.com) são alunas do curso técnico integrado em meio ambiente, no IFES - Campus Vitória.

Referências

- [1] A. L. D. Froés, *Astronomia, astrofísica e cosmologia para o Ensino Médio*, Rev. Bras. Ensino Fís. **36**(3), 1–15 (2014).
- [2] F. Damasio, *O início da revolução científica: questões acerca de Copérnico e os epiciclos, Kepler e as órbitas elípticas*, Rev. Bras. Ensino Fís. **33**(3), 1–6 (2011).
- [3] K. S. Oliveira Filho e M. F. Saraiva, *Astrologia não é ciência* (2001), disponível em www.if.ufrgs.br/ast/astrologia.htm (acesso em 29 jul. 2020).
- [4] M. C. Matos, *A influência dos astros: técnica ou metafísica?*, Revista Espaço Aberto - USP (2009), disponível em www.usp.br/espacoaberto/?p=1029 (acesso em 29 jul. 2020).
- [5] C. M. Porto e M. B. D. S. M. Porto, *A evolução do pensamento cosmológico e o nascimento da ciência moderna*, Rev. Bras. Ensino Fís. **30**(4), 4601.1–4601.9 (2008).
- [6] P. R. Mariconda, *A contribuição filosófica de Galileu*, in *350 anos do "Discorsi intorno a due nuove scienze" de Galileo Galilei* (Marco Zero, Rio de Janeiro, 1989).
- [7] J. S. Jensen, *Epistemologia*, REVER, **13**(2), 171–191 (2013).
- [8] D. Albergaria, *O legado de Galileu para a ciência moderna*, Divulgación y Cultura Científica Iberoamericana, disponível em www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/reportajes027.htm (acesso em 29 jul. 2020).

- [9] F. Suzzarini, *A astrologia egípcia* (Publicações Dom Quixote, Lisboa, 1984).
- [10] K. S. Oliveira Filho e M. F. Saraiva, *Precessão do eixo da Terra* (2016) disponível em astro.if.ufrgs.br/fordif/node8.htm (acesso em 29 jul. 2020).
- [11] G. Mbarga e J. M. Fleury, *O que é ciência?*, in *Curso on-line de jornalismo científico, Lição 5*, WFSJ, disponível em www.wfsj.org/course/pt/pdf/mod_5.pdf (acesso em 29 jul. 2020).
- [12] K. Hueck, *As verdades inconvenientes sobre a astrologia* (2019), disponível em super.abril.com.br/ciencia/verdades-inconvenientes-sobre-astrologia/ (acesso em 29 jul. 2020).
- [13] N. Romanzoti, *Acreditar em horóscopo não é inofensivo: como a astrologia pode te fazer mal*, Hypescience, disponível em hypescience.com/astrologia-horoscopo-mal/amp/ (acesso em 29 jul. 2020).
- [14] Fetalmed.net, *Qual a influência da lua no parto?* (2020), disponível em www.fetalmed.net/qual-a-influencia-da-lua-no-parto/ (acesso em 29 jul. 2020).

Uma breve reflexão sobre a Mostra de Astronomia do Espírito Santo

Adriano M. Oliveira¹ e Lucia Helena Horta Oliveira²

¹Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Guarapari

²EEEM Dr. Silva Mello, Guarapari/ES

Resumo

Esse artigo traz um breve relato sobre as duas edições da Mostra de Astronomia do Espírito Santo e levanta uma discussão sobre a influência que esse tipo de evento tem no processo de formação discentes. As comparações entre as quantidades tanto de trabalhos inscritos quanto de professores orientadores, participantes das duas etapas, revelam a necessidade de criar meios para que o corpo docente da rede pública de ensino possa dedicar tempo a atividades de orientação, visto que, essas práticas contribuem para o melhoramento da relação ensino-aprendizagem.

Abstract

In this paper we briefly discuss the two editions of the Mostra de Astronomia do Espírito Santo and its influence in process of student formation. One comparison between numbers of projects registrants and also total teachers registrants, of these editions, we see that is necessary to create forms for the teacher of public school could dedicate time for orientation activities, once these practices help to better the teaching-learning relationship.

Palavras-chave: mostra de astronomia, ensino médio, ensino, pesquisa, extensão.

Keywords: show of astronomy, high school, teaching, scientific research, extension actions.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.30806](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.30806)

1 Introdução

O movimento de realização de feiras científicas teve início por volta dos anos 1960 [1]. Esse evento é caracterizado, basicamente, pela exposição de trabalhos técnico-científicos elaborados por estudantes sob a orientação de professores. Gonçalves [2] diz que:

as feiras de ciências consistem na apresentação de trabalhos e na relação expositor-visitante na qual são apresentados materiais, objetivos, metodologia utilizada, resultado e conclusões obtidas. No caso da mostra, temos, palestras e um acompanhamento dos melhores trabalhos apresentados nesses eventos. Os trabalhos são elaborados de forma a serem planejados e executados pelos estudantes com o professor como orientador do processo.

Dentro desse contexto a mostra é um evento mais completo que a feira, já que, além da exposição, também reserva espaços para discussões e palestras, por exemplo. Em vista disso, a mostra

científica se torna um complemento dos trabalhos realizados nas feiras e, por esse motivo, escolhemos estudar as melhorias que a implementação de uma mostra estadual, a Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES), pode trazer para os alunos do ensino médio, em particular os da rede pública de ensino, sendo este o primeiro artigo comparativo entre as duas primeiras edições do evento.

Durante o processo de preparação, estudo e montagem dos trabalhos, a dinâmica tradicional de ensino é mudada, enquanto os professores deixam o papel de transmissor do conhecimento, passando a atuar como mediadores, os alunos se tornam protagonistas da relação ensino-aprendizagem, propondo hipóteses e aprendendo com seus erros. Essa forma de atuação está alinhada com a metodologia de ensino por investigação que, por sua vez, é uma alternativa para o método tradicional de ensino, permitindo uma aproximação dos conteúdos ministrados em sala

de aula às habilidades previstas nas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) da educação básica [3]. Além disso, trabalhando com esse método, a pesquisa científica direcionará tanto os processos de confecção dos trabalhos para a mostra quanto os conteúdos curriculares previstos na legislação da educação básica.

Dessa forma, a participação em mostras científicas pode promover mudanças significativas nos alunos, uma discussão mais aprofundada sobre esse assunto pode ser encontrada em [4, 5]. A apresentação dos trabalhos é conduzida pelos alunos, colocando-os na posição de protagonistas e, ainda, levam a toda comunidade, que visita a mostra, todo o conhecimento produzido ao longo da preparação dos pôsteres e seminários, mostrando que a utilização da mediação pode ensinar e de transmitir conhecimento, além de: modificar a tradicionalidade da sala de aula formal e, também, atingir mais pessoas com mais efetividade. Ainda, com a implementações de ações como esta, atende-se a recomendação das DCN no tocante ao desenvolvimento da capacidade de pesquisa como parte importante na “busca da (re) construção do conhecimento” [3]. Além disso, amplia a atuação do professor, segundo [6]:

educar pela pesquisa tem como condição essencial primeira, que o profissional da educação seja pesquisador, ou seja maneje a pesquisa como princípio científico e educativo e a tenha como atitude cotidiana.

Ou seja, é necessário que o professor oriente o aluno para que sua pesquisa tenha uma direção e produza um trabalho rico em conhecimento. Nesse caminho, as mostras científicas agem como disseminadoras dos trabalhos e do conhecimento produzido, para públicos diversos. Devido a relevância desses eventos, tanto para a formação dos alunos quanto para a mudança da prática docente, vários trabalhos têm usado eles como base de estudo para suas pesquisas, por exemplo, o levantamento bibliográfico, entre os anos 2008-2018, de caráter exploratório qualitativo realizado sobre feiras de ciências [7], a discussão sobre a importância do protagonismo do aluno no contexto escolar a partir de sua participação em mostras com temáticas de astronomia [8] e uma revisão bibliográfica sobre o ensino de ciências e as feiras, buscando ressignificar o aprendizado significativo e o ensino mais dialógico [9], ou seja, a relação ensino-aprendizagem mais funda-

mentada no diálogo entre as partes (professor e aluno) envolvidas nesse processo.

Diante disso, faremos aqui um breve relato acerca da influência que as feiras e mostras científicas têm na efetivação de futuros projetos de pesquisa desenvolvidos no Espírito Santo, em particular analisaremos aqueles trabalhos que participaram da MAES. O evento estadual é realizado anualmente e está em sua terceira edição. O objetivo do estudo foi fazer um acompanhamento dos trabalhos apresentados nas duas edições do evento (2018-2019) traçando: mudanças, adaptações necessárias, apresentando resultados e possibilidades para novas pesquisas.

2 MAES 2018

Na edição 2018 da Mostra de Astronomia do Espírito Santo, primeiro ano do evento, 89 (oitenta e nove) trabalhos foram inscritos. Destes, 65,2% decorrentes de Institutos Federais de ensino (IFES) e o restante, 34,8%, tiveram como autores alunos das escolas estaduais, como mostrado na figura (1). Não tivemos projetos de escolas particulares nem de alunos do 9º ano, na referida edição. Logo, todos os projetos foram elaboradas e apresentados por alunos que estavam cursando o ensino médio durante o ano de 2018, sendo os três melhores, após duas fases, premiados com bolsas CNPq de PIBIC-Jr (ICJ), para o ano de 2019.

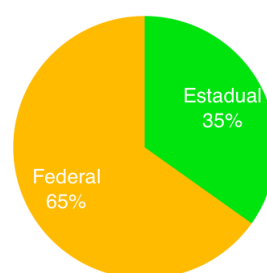


Figura 1: A MAES2018 teve participação de escolas federais e estaduais. A fatia verde, correspondente a 35%, refere-se a porcentagem dos trabalhos produzidos por alunos da rede estadual e a parte em amarelo está ligada às propostas do IFES, cerca de 65% dos projetos foram realizados por alunos ligados a esta instituição de ensino.

A primeira fase foi dividida em três etapas, contudo os trabalhos foram inscritos apenas para a etapa de Cariacica, onde 32 (trinta e dois) professores e cerca de 350 (trezentos e cinquenta) alunos, participaram do evento, a foto oficial desta

etapa é mostrada na figura (2). Nas etapas in-

Foto final Oficial do evento



Figura 2: Essa é a foto oficial da edição 2018 da Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES2018).

terioranas, realizamos uma bateria de seminários ministrados pelos professores convidados, observação do céu noturno com telescópios, um *tour* pelo mapa de Marte, oficina de foguetes e de caça a meteoros. Toda a estrutura do evento foi colocada à disposição do público.

Desta primeira fase foram selecionados 15 (quinze) trabalhos para a fase final, onde os projetos foram apresentados de forma oral a uma banca de especialistas com destacada relevância na comunidade científica, que atuaram como avaliadores. A segunda fase, teve duração de dois dias e ocorreu um mês depois da seletiva, além dos seminários, grande parte da estrutura acima citada foi novamente montada para atender escolas e toda a comunidade interessada. Ao final das apresentações, 15 (quinze) alunos foram agraciados com bolsas de ICJ e tiveram seus trabalhos acompanhados pelos professores e pesquisadores ligados ao Cosmo-ufes. Além disso, participaram de encontros mensais, durante o ano de 2019, que ocorreram tanto no Observatório Astronômico do IFES Guarapari (OAIG) quanto em parques estaduais, centros históricos - o que lhes permitiu: melhorar seus projetos, ampliar o conhecimento sobre a cultura, fauna, flora capixaba, e melhorar a qualidade do conhecimento adquirido. Ademais, esse grupo de alunos participou de palestras envolvendo tópicos de astrofísica, astronomia, astronáutica, cosmologia e foram convidados a participar de todas as ações do Cosmo-ufes, tais como o Verão Quântico, o Inverno Astrofísico e a comemoração dos 100 anos do Eclipse de Sobral, todos ocorreram durante a vigência da bolsa ICJ. Por fim, participaram das ações abertas ao público de observações do céu e receberam orien-

tação para futuros estudos de elementos teóricos ligados ao tema da mostra. Ou seja, os bolsistas foram imersos tanto nos congressos científicos como na condução de ações com a comunidade externa.

3 MAES 2019

Para a edição 2019, algumas mudanças foram implementadas, por exemplo, os melhores trabalhos não foram premiados com bolsas, mas sim com medalhas e troféu, já que não conseguimos recursos para mantê-las nas agências de fomento daquele ano. Por outro lado, dividimos a competição em categorias e ampliamos o público alvo, permitindo a participação tanto de alunos do 9º ano do ensino fundamental quanto de escolas privadas. Dessa forma, ampliamos a diversidade de escolas participantes, como mostra a figura (3), tivemos 5% dos trabalhos confeccionados pelas escolas privadas e a mesma quantidade por escolas municipais (alunos de 9º ano), já os projetos das escolas estaduais corresponderam a 21% do total e o IFES inscreveu 70% dos trabalhos. Por-

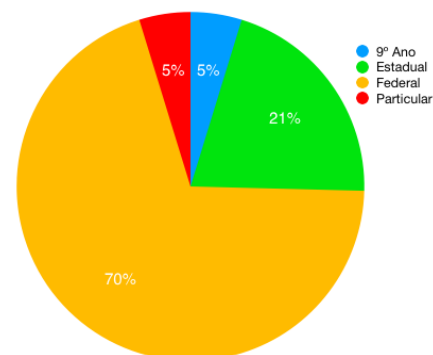


Figura 3: Esse gráfico mostra como foi a divisão das escolas participantes da MAES2019. Em vermelho e azul, com 5% do total de trabalhos, estão as escolas particulares e escolas municipais (alunos de 9º ano), respectivamente, ambas com três trabalhos apresentados. Em verde, correspondendo a 21% do total de trabalhos, está representado os trabalhos da rede estadual, com 13 (treze) trabalhos apresentados, e em amarelo os trabalhos do IFES, cerca de 70% dos trabalhos, ou 44 (quarenta e quatro) projetos, foram confeccionados por alunos ligados a esta instituição de ensino.

tanto, tivemos representantes de todo o público alvo, do mesmo modo que na edição 2018. Analisando os números apresentados nas figuras (1) e (3), verificamos que o IFES ampliou sua participação em quase 5%, enquanto as escolas estaduais

tiveram uma redução de 14%. Já o número total de inscritos sofreu redução de 28,1%, saindo de 83 (oitenta e três) inscritos em 2018 para 64 (sessenta e quatro) em 2019. Uma comparação entre as quantidades de trabalhos por rede de ensino é apresentada na Figura (4). Do mesmo modo, o número de professores orientadores também reduziu, saindo de 32 (trinta e dois) e passando para 14 (quatorze), o que corresponde a uma queda de 56,25%.

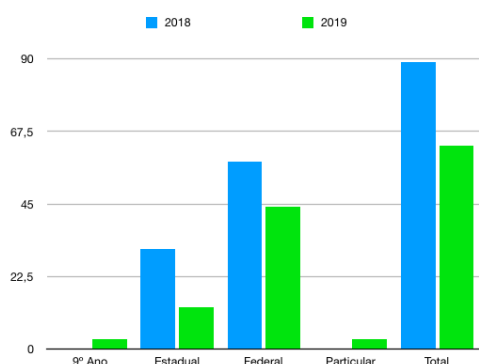


Figura 4: Esse gráfico mostra um comparativo entre a quantidade de trabalhos apresentados nas duas edições da MAES, por rede de ensino, em azul estão as quantidades referentes ao ano de 2018 e em verde os dados do ano de 2019.

Apesar dessa queda, tivemos a percepção de que os trabalhos apresentados durante a MAES2019 tiveram um acréscimo de complexidade, quando comparadas as duas edições do evento, mostrando uma melhora na relação ensino-aprendizagem e na mediação feita pelos professores orientadores. Além do mais, cerca de 30% das inscrições vieram das escolas do interior do estado. Mesmo em menor número esses projetos mostram certo avanço tanto na rede de comunicação criada no interior do estado quanto no envolvimento das escolas para participar da MAES. Outra mudança gerada pela limitação de recursos foi a redução na quantidade de atividades ofertadas ao público. Para essa edição mantivemos as apresentações dos trabalhos, seminários dos professores visitantes (que também atuaram como avaliadores dos projetos nas duas fases) e a observação do céu noturno com telescópios. Uma foto da etapa de Vitória do evento é apresentada na Figura (6), esse foi o local onde tivemos a maior concentração de trabalhos durante a primeira fase da MAES.

Desta primeira fase, foram selecionados 21

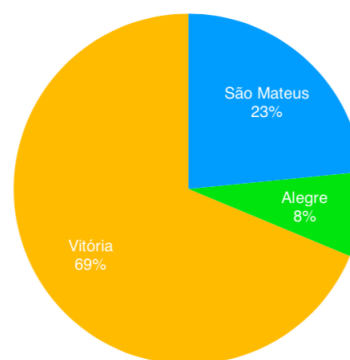


Figura 5: Nessa figura está representada a distribuição dos projetos cadastrados para as etapas de Alegre (com 5%), São Mateus (com 23%) e Vitória (com 69%), para a primeira fase da Mostra de Astronomia do Espírito Santo 2019 (MAES2019).



Figura 6: Essa é a foto oficial da edição 2019 da Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES2019).

(vinte e um) trabalhos para a fase final, sendo 13 (treze) do IFES, 5 (cinco) da rede estadual, 1 (um) da rede municipal e 2 (dois) da rede privada, que ocorreu no Observatório Astronômico do IFES Guarapari e teve a duração de dois dias. Nesta fase, os projetos foram apresentados de forma oral para uma banca de avaliadores, pesquisadores ligados ao Cosmo-ufes, que também ministraram seminários sobre temas que abordaram assuntos de “Buracos Negros: Fotografando o invisível” e “Explicando o Nobel de física 2019”, durante os dois dias de evento. Após essa etapa os destaques foram:

- **Escola Particular (Medalha de Ouro)** - TSI – Telescópios para a síndrome de Irlen, produzido por alunos do Marista. Essa síndrome causa um desequilíbrio na capacidade de adaptação à luz e está ligada ao deficit na leitura, o que também causa problemas no uso de telescópios convencionais. Nesse sentido, o projeto foi fundamentado na adaptação de um telescópio para que portadores desta síndrome tivessem a oportunidade de enxergar as estrelas sem os prejuízos desta.

Para isso foi criada uma lente com características semelhantes aos óculos usados por pessoas que possuem essa sensibilidade.

- **Escola Estadual (Medalha de Ouro)** - Registro de meteoros na constelação de Hydra. Esse trabalho apresentou um estudo referente a captação do registro dos meteoros vindos da região da constelação de hydra, realizada pela estação de videomonitoramento de pequenos objetos da escola Dr. Silva Mello. Com as imagens o aluno encontrou os padrões da quantidade de raios registrados mensalmente, da velocidade média, magnitude e direção.
- **Escola Municipal (Medalha de Ouro)** - Celebidades e descobertas astronômicas, produzido por alunos do 9 ano. O Projeto buscou realizar uma viagem no tempo e apresentou os grandes nomes da Astronomia, suas contribuições e descobertas. Além disso, explorou os saberes adquiridos pelos alunos sobre conceitos, invenções e história da astronomia, bem como a evolução do conhecimento sobre essa área. O recorte escolhido foi a compreensão do sistema solar e fenômenos que acontecem no nosso dia a dia. Buscou-se incentivar tanto a criatividade quanto um alinhamento às habilidades e competências previstas na BNCC, além da prática experimental que complementa o conteúdo teórico e leva a interdisciplinaridade, via investigação.
- **Escola Federal (Medalha de Ouro e Melhor trabalho da MAES2019)** - Astrologia não é uma ciência, produzido por alunos do IFES, campus Vitória. O trabalho trouxe a luz uma discussão acerca da influência das estrelas sobre a vida na Terra, buscando desmistificar conceitos populares fundamentando sua pesquisa em dados científicos.
- **Escola Federal (Medalha de Prata)** - Física e Astronomia, que abordou a física dos telescópios, da teoria à construção de um telescópio newtoniano. O trabalho foi produzido por alunos do IFES, campus Guarapari.
- **Escola Federal (Medalha de Bronze)** - A morte térmica do Universo, outro trabalho do IFES, campus Vitória.

4 Considerações finais

A mostra é uma importante aliada para as mudanças metodológicas tradicionais. Elas Incentivam o uso de metodologias investigativas como uma alternativa para melhorar a qualidade da relação ensino-aprendizagem e retorna ao aluno a responsabilidade por ampliar seu próprio conhecimento. A Mostra de Astronomia do Espírito Santo, cuja terceira edição ocorrerá durante o ano de 2020, é um exemplo desse tipo de ação que exercita o protagonismo estudantil.

A partir de uma comparação entre os trabalhos apresentados durante as duas edições do evento, percebemos que houve uma melhora significativa na qualidade das propostas e da organização do evento. Ainda, percebemos um pequeno avanço, oriundo das mudanças na forma de divulgar o evento, já que tivemos escolas do interior do estado participando da segunda edição do evento, fato que não ocorreu durante o ano de 2018. Contudo, tivemos uma redução de quase 30% no número de trabalhos inscritos e de mais de 50% de professores orientadores, com maior impacto na participação das escolas estaduais, o que, de certo modo, pode ter sido influenciado pela não oferta de bolsas para os melhores trabalhos no ano de 2019. Mas, para um evento estadual, julgamos baixo o número de inscritos, o que deixa clara duas fragilidades: (1) a divulgação da MAES ainda não é a ideal e (2) a falta de interesse dos professores do ensino básico em participar desse tipo de eventos, fato comprovado pelo baixo número de professores orientadores durante a última edição do evento, apenas 14 (quatorze).

Sendo assim, julgamos que é necessário criar meios para que os docentes possam se sentir atraídos em participar desse tipo de evento, em particular os da rede estadual. Uma possibilidade seria a premiação dos professores e, de algum modo, permitir a alocação de carga horária, talvez nos moldes de planejamento, para orientação de equipes de alunos interessadas em participar de mostras científicas. Esse tipo de incentivo, juntamente com ações de formação continuada docente, que fomentem o pensar científico atrelado ao ensino de astronomia utilizando metodologias ativas, como a proposta no trabalho [10], podem ajudar a alinhar os conteúdos de astronomia às habilidades previstas na BNCC e na DCN, o que além de ampliar o número de trabalhos inscritos na MAES e similares, vai melhorar

significativamente a qualidade da relação ensino-aprendizagem.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos pesquisadores que, de algum modo, colaboraram para a realização dessas duas primeiras edições do evento, de modo especial, ao digníssimo professor doutor emérito Antônio Brasil, que nos presenteou com sua ilustre presença durante a MAES 2019, com muito humor e sapiência invejável. Certamente, um dos maiores físicos da nossa época que nos deixou uma lição de humildade e amor pela ciência. Infelizmente não poderemos mais ter o prazer de sua presença nas próximas edições da Mostra de Astronomia do Espírito Santo, mas levaremos a cada edição os ensinamentos por ele deixado. Em tempo, agradecemos a CAPES, FAPES, UFES e IFES pelo apoio e suporte dado durante o evento.

Sobre os autores

Adriano Mesquita Oliveira (adriano.oliveira@ifes.edu.br) é doutor em física pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e: *i*) atua como professor de física do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES-Guarapari), onde ministra aulas para os ensinos médio e superior; *ii*) coordena o Observatório Astronômico do IFES-Guarapari (OAIG) e o curso de Formação Continuada para Professores do Ensino Fundamental; *iii*) está como diretor da Diretoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Extensão e *iv*) faz parte da equipe executora da Mostra de Astronomia do ES e Encontro de Astronomia do ES, dentre outras atividades.

Lucia Helena Horta Oliveira (lucia-horta@hotmail.com) tem mestrado em ensino de física pelo IFES (2020) e é professora da EEEM Dr. Silva Mello (Secretaria de Educação do Estado do Espírito Santo) em Guarapari, ES. É co-organizadora da Mostra de Astronomia do Espírito Santo.

Referências

[1] R. Mancuso e I. Leite Filho, *Feiras de ciências no Brasil: uma trajetória de quatro*

décadas, in *Programa nacional de apoio às feiras de ciência da educação básica - Fena-ceb* (MEC, Brasília, 2006), 9–40.

- [2] T. V. O. Gonçalves e S. R. G. Neves, *Feiras de ciências*, Revista do Ensino de Ciências **24** (1987).
- [3] Brasil, Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, *Diretrizes curriculares nacionais da educação básica* (2013).
- [4] R. Mancuso, *A evolução do programa de feiras de ciências do Rio Grande do Sul: avaliação tradicional X avaliação participativa*, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina (1993).
- [5] M. E. C. Lima, *Feiras de ciências: o prazer de produzir e comunicar*, in *Quanta ciência há no ensino de ciências*, editado por A. C. Pavão e D. Freitas (EduFSCar, São Carlos, 2011), 195–205.
- [6] P. Demo, *Educar pela pesquisa*, Coleção educação contemporânea (Autores Associados, Campinas, 2011), 8^a ed.
- [7] M. Gallon, L. Richter, C. Silva, J. Rocha Filho e S. Nascimento, *Feiras de ciências nas teses e dissertações brasileiras: levantamento bibliográfico dos últimos 10 anos*, in *XII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências* (2019).
- [8] A. O. Bernardes, *Mostras de astronomia desenvolvidas em colégio público estadual do Rio de Janeiro: um fator motivador ao estudo de ciências e ao incentivo do protagonismo do aluno*, in *Anais V CEDUCE* (2018).
- [9] R. R. Bertoldo e M. B. da Cunha, *Feiras de ciências na escola*, Atos de Pesquisa em Educação **11** (1), 293 (2016).
- [10] A. M. Oliveira, C. K. da Silva Machado, A. C. T. Monteiro, R. C. do Nascimento e P. dos Santos, *Continuing education: a solution proposal for problems in the teaching of astronomy*, [arXiv:2002.05444v2](https://arxiv.org/abs/2002.05444v2) (2020).

A escola vai à Mostra de Astronomia do ES: diálogos entre a educação formal, não formal e informal para o desenvolvimento da cultura científica

Lucia Helena Horta Oliveira

EEEM Dr. Silva Mello, Guarapari/ES

Resumo

Esse artigo derivou do desenvolvimento de atividades de educação em Astronomia, com vistas a incentivar a formação de futuros pesquisadores. Seu objetivo foi apresentar como ocorreu a participação de estudantes da Escola Estadual de Ensino Médio Dr. Silva Mello na Mostra de Astronomia do ES (MAES) e de como isso promoveu o envolvimento e participação nas três modalidades de educação, formal, informal e não formal, destacando a articulação entre elas. Com intuito de formar cidadãos com interesses para o desenvolvimento de pesquisas científicas sobre temas astronômicos, desenvolvendo o gosto pela busca de conhecimento e para motivação dessa ação, formamos grupos para apresentação de trabalhos na MAES, utilizada como espaço de educação não formal. O evento contou com apresentação de trabalhos, palestras e premiações. Como resultado, um dos trabalhos apresentados pelos alunos foi premiado. Ganhou especial relevância a educação informal, momento em que os alunos discutiram sobre ciências, trazendo-a para suas vidas diárias.

Abstract

This article is derived from the development of educational activities in astronomy, with a view to encouraging the training of future researchers. The goal is to present how the participation of students from EEEM Dr. Silva Mello took place in the Mostra de Astronomia do ES (MAES), and how that promoted their involvement and participation in the three types of education, formal, informal and non-formal, highlighting the articulation between them. In order to train citizens with interests for development of scientific research on astronomical themes, developing a taste for the search for knowledge and to motivate this action, we form groups to present works at MAES, used as a non-formal education space. The event included the presentation of works, lectures and prizes. As a result, one of the works presented by the students was awarded. Informal education has gained special relevance, when students discussed science, bringing it to their daily lives.

Palavras-chave: ensino em astronomia, mostra de astronomia do Espírito Santo, educação formal, não formal e informal.

Keywords: teaching in astronomy, astronomy exhibition of Espírito Santo, formal, non-formal and informal education.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31433](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31433)

1 Introdução

A astronomia como ciência que pesquisa os corpos celestes pode ser considerada a primeira ciência já registrada. Desde os persas, hindus e outras culturas orientais, o estudo dos movimentos dos corpos celestes e a aplicação de seus conhecimentos sempre buscaram entender o cotidiano do homem. Até hoje, a astronomia encanta e desperta interesse. Em um planetário, na escola, ao ar livre, em um sítio arqueológico, a leitura do

cosmos motiva. Assim, a aprendizagem de astronomia e o desenvolvimento pelo gosto científico podem acontecer em diversos espaços, sobre os quais passamos a tratar.

De um modo geral, a diferença entre educação formal, não formal e informal pode ser estabelecida a partir do espaço escolar. As ações educativas escolares seriam as formais e aquelas realizadas fora da escola seriam as não formais e as informais seriam as realizadas no seio familiar, nos

grupos de convívio, roda de amigos, onde também se aprende, fora da escola. A educação não formal pode ocorrer em instituições como museus, centros culturais, ONGs e a educação informal ocorre, também, por meio da mídia em geral [1]. Quanto aos espaços, é possível estabelecer a seguinte diferença: o espaço formal é a escola e o espaço não formal, seria qualquer espaço fora da escola, onde uma ação educativa pode ocorrer.

Quando tentamos expressar a forma de tornar conteúdos científicos acessíveis à população, encontramos termos como: difusão, divulgação, disseminação e popularização da ciência. O fato é que, tanto no espaço formal quanto no espaço de educação não formal, caso de um planetário, é possível contribuir para que a ciência chegue ao grande público, capacitando-o a compreender o mundo e o cosmos [1]. Apesar de muitas distinções entre as formas de socializar a ciência, o fim será sempre o mesmo, levar a ciência ao grande público [2]. Desse ponto de vista, Gouvêa defende que o termo popularização da ciência deve ser mais apropriado a ações de divulgação científica feitas diretamente ao público, tornando o termo mais completo que disseminação ou difusão da ciência [3]. Baseado na revisão bibliográfica apresentada por Marandino et al. [4], e reconhecendo a não existência de uma definição final entre os termos, vez que é grande o elenco de autores que se debruça a pesquisar as questões relativas tanto à educação formal, educação não formal e informal, bem como a potencialidade dos espaços para divulgação científica, neste artigo, apresentaremos uma discussão tanto sobre tais terminologias quanto sobre a finalidade da popularização da ciência.

Assim, o objetivo deste trabalho foi apresentar como ocorreu a participação de estudantes da Escola Estadual de Ensino Médio Dr. Silva Mello na Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES) e de como isso incentivou e promoveu seu envolvimento e participação nas três modalidades de educação, destacando a forte articulação entre elas. Esta escola localiza-se no município de Guarapari e possui dois turnos, com 28 turmas de Ensino Médio, somando um total de quase mil alunos matriculados. Participaram da MAES cinco grupos de alunos do primeiro e três do terceiro ano do Ensino Médio, cada um dos grupos contendo cinco alunos.

2 Educação formal como base do aprendizado

A educação formal ocorre em ambiente escolar, onde o currículo oficial ordena o desenvolvimento dos trabalhos. De forma a trazer temas motivadores para o espaço escolar, foram adaptados, nas turmas de primeiro e do terceiro ano, temas gerais da astronomia ao conteúdo básico lecionado normalmente para o ensino de Física, tais como cosmologia, arqueoastronomia, estações do ano, calendários, o que provocou muito interesse nos alunos. Aproveitamos, quando possível, a interdisciplinaridade com outras matérias, tais como Matemática, Literatura e Geografia. Isso, apesar de não ser muito usual o estudo da astronomia durante a trajetória formativa do aluno do Ensino Médio, na formação do futuro professor ou no ambiente escolar. A despeito disso, podemos usar a astronomia como uma articulação para a formação de saberes disciplinares. Essa ponte se torna importante, também, para facilitar a aprendizagem de astronomia nos espaços não formais, principalmente para a diminuição de erros conceituais, concepções alternativas, mitos e crenças sobre fenômenos astronômicos. Ao abordar temas como origem do Sol, da Lua, o conceito de calendário, as diferenças entre solstício e equinócio, contamos com a participação dos professores de Literatura, apontando esses eventos nas culturas antigas, do professor de Geografia e do professor de Matemática, com relação aos cálculos de distância entre o planeta Terra e outros planetas do sistema solar.

A educação formal é a base de que precisamos para dar o pontapé inicial para que os trabalhos se desenvolvam e possam ocorrer nos espaços não formais. Sem a educação formal fica mais difícil esses trabalhos alcançarem cunho científico. Isso é importante para que se desenvolva o espírito científico nos alunos, para que eles consigam superar a curiosidade ingênua passando à curiosidade científica [5]. Por exemplo, pelo fato de a escola estar localizada no município de Guarapari, consta do imaginário dos alunos a influência da Lua sobre as marés, mas, até então, eles não tinham estudado esse tópico do ponto de vista científico. Assim, eles podem se aprimorar, quando surgirem temas tais como a Lua, as marés, as estações do ano, o movimento da Terra na educação informal. Em diálogos e trocas, eles poderão discutir com propriedade esses assuntos.

Neste artigo, discutiremos as contribuições da Mostra de Astronomia do ES promovida pela UFES para conhecimento de temas como astrofísica, astronomia, astronáutica e cosmologia, tomando a MAES como espaço de educação não formal. A participação na MAES partiu de uma iniciativa da autora deste artigo que, na época, era aluna do Mestrado Profissional em Ensino de Física do IFES. O desenvolvimento dos trabalhos apresentados na MAES foi enriquecido pela orientação de professores da UFES, o que tornou possível manter uma parceria entre Universidade Federal e escolas públicas estaduais. Nesse evento anual, os alunos apresentam trabalhos e competem com trabalhos de outras instituições. A participação na MAES movimentou o espaço escolar, trazendo para o centro do palco o protagonismo dos alunos e a contribuição do corpo técnico e pedagógico.

3 A Mostra de Astronomia do ES como espaço de educação não formal

O segundo aspecto a ser analisado é a educação não formal e o espaço onde esta ocorre. A educação não formal tem caráter sempre coletivo e envolve práticas educativas desenvolvidas fora da escola, em espaços previamente selecionados para tal, sem a obrigatoriedade de seguir os ritos do espaço escolar. No espaço não formal, quebram-se hierarquias, superam-se medos, desenvolvem-se potencialidades. Nesse caso em específico, os alunos acompanharam a professora a locais fora da escola, tais como, morros e praias no município de Guarapari, ES, onde puderam montar os telescópios adquiridos pela EEEM Dr. Silva Mello, aprendendo, na prática, sua montagem, instrumentação, apontamento e observação do céu. Nessas atividades em espaços não formais, os alunos trazem um planejamento de estudos para utilizarem onde poderão observar, estudando as características e a utilização dos equipamentos, suas curiosidades, mapeando a abóbada celeste localizando planetas, estrelas, constelações etc... Nesse contexto trabalham como transmissores do conhecimento aprendido no espaço formal. Nos espaços fora da escola utilizados para observação do céu, os alunos recebem muitos visitantes que interagem e dialogam, fazendo-os assumir a condução do trabalho. Essas ações foram orientadas pela professora e contavam com o apoio do Ins-

tituto Federal do Espírito Santo (IFES), considerando que em 2018 cursava o mestrado em Ensino de Física desta instituição, e alguns tópicos foram discutidos com os professores do mestrado, tendo em vista a preparação dos alunos. Em outras ocasiões, as ações foram apoiadas pela Universidade Federal do Espírito Santo, por meio do Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação da UFES (PPGCosmo) e do Núcleo de Astrofísica e Cosmologia da UFES (Núcleo Cosmo-Ufes)¹, no que diz respeito à utilização do material de apoio, com empréstimo de telescópio, palestras e orientações. A presença das entidades de educação superior, no processo de ensino-aprendizagem em espaço não formal, é feito através de orientações e palestras. O sucesso do projeto se dá em decorrência da união das forças em favor da iniciação científica e de atividades de popularização da ciência. Queiroz et al. demonstram que a educação não formal utilizada em espaço não formal institucionalizado tem características próprias e diferentes da educação formal, feita dentro da escola [6]. Contudo, ao usarmos esses espaços não formais, precisamos ficar atentos à não escolarização deles [2–4, 6–9]. As práticas escolares não podem ser repetidas nos espaços não formais, sob pena de descaracterizarmos sua riqueza e criatividade. Pivelli e Kawasak alertam [10]:

[...] é preciso ter cuidado para não escolarizar as instituições. Acredita-se que o objetivo maior destes locais que expõem biodiversidade é o de despertar curiosidades, paixões, possibilitar situações investigadoras, gerar perguntas que proporcionem a sua evolução e não somente respostas às questões que são colocadas pelo ensino formal.

Rocha e Fachín-Terán destacam a relevância da escola no processo, ao discutirem a importância dos espaços não formais para o ensino de Ciências, e acentuam a impossibilidade de alcançar uma educação científica mais completa sem a parceria da escola com esses espaços [11]. Assim, os espaços não formais devem atuar em complementaridade aos espaços formais. Nesses espaços, os alunos pesquisam, aprendem, se planejam e ensinam, experimentando a iniciação científica. A educação não formal se transforma em um observatório móvel e acessível a toda a população. Além das incursões aonde a população tem acesso

¹www.cosmo-ufes.org.

fácil, o grupo de alunos da referida escola geralmente participa de atividades específicas com a orientação de professores doutores da UFES e do IFES, tais como visitas, seminários e minicursos. Essas incursões geralmente saem da rotina escolar e os alunos têm contato com um aprendizado mais científico, muitas vezes aprendendo cálculos sofisticados específicos da astronomia, como, por exemplo, cálculos da astronomia de posição, ensinados por especialistas da área.

Outra atividade da educação não formal realizada pelo grupo de alunos foi ajudar na manutenção e no trabalho de estudo da estação de vídeo monitoramento de pequenos objetos, a qual foi adquirida pelo projeto do Grupo de Astronomia de Guarapari – Dr. Silva Mello (GAG DSM), formado em 2018, por cerca de 50 alunos desta mesma escola, dos quais três são orientandos da autora deste artigo e receberam bolsa de iniciação científica em 2018, provenientes do CNPq. Esse projeto conta com uma câmera com lente especial que monitora uma área específica do céu noturno e trabalha na suíte UFO Capture e Analyzer, em parceria com o projeto EXOSS Citizen Science Project.² O processo se completa com o pareamento com outra estação, para obter confiabilidade nos dados de órbitas dos objetos registrados (meteoros). Os alunos trabalharam com ele, durante o ano de 2019, conseguindo desenvolver pesquisas interessantes para seus estudos. Esse projeto foi responsável por desenvolver uma pesquisa sobre estudos de captação dos meteoros com procedência do campo da constelação de Hydra, o cálculo provável de suas velocidades, a magnitude média, a quantidade de capturas feitas pela câmera e o período dessas capturas.

A pesquisa que foi apresentada na última MAES (2019) classificou o grupo de estudos em primeiro lugar em sua categoria, o de grupo de estudantes de Escolas Estaduais. Com o projeto em andamento, a escola conseguiu a doação de mais uma câmera feita pelo projeto EXOSS Citizen Science, que funciona com um programa novo, a princípio instalado como teste. O programa foi desenvolvido pela NASA³ e tem a EXOSS como correspondente no Brasil. O algoritmo CAMS é mais moderno e preciso e, com o pareamento, ele atinge grau ótimo de confiabilidade.

O projeto iniciou-se com parceria de análises

feitas do telescópio Pan Starrs,⁴ que conta com o software Astrométrica, no ano de 2018 e que é bem conhecido de escolas nacionais e internacionais. O programa Astrométrica⁵ possui um software de acesso livre. Através de cadastro prévio, disponibiliza para escolas e grupos de astronomia do mundo inteiro 4 imagens sequentes, mensais, tiradas pelo telescópio Pan Starrs que fica no Havaí. Através dessas imagens sobrepostas, os voluntários cadastrados procuram vestígios de movimentações parecidas com objetos que podem ser classificados como asteroides. Os objetos localizados são marcados e enviados através de um código em um relatório para uma área de pesquisa da NASA. Os colaboradores que encontram esses objetos recebem um certificado de participação no programa. Posteriormente esse objeto estudado pode ser confirmado como um asteroide. Nesse caso, o colaborador que enviou o código do objeto encontrado tem o direito de colocar o nome que quiser no objeto. Essa é uma parceria que colabora para a busca de possíveis asteroides e é de cunho internacional.

A partir do trabalho envolvido nesse projeto, um grupo de alunos apresentou estudos desenvolvidos sobre o funcionamento do software Astrométrica na primeira Mostra de Astronomia do ES, em 2018, ficando como finalista, recebendo três bolsas de iniciação científica júnior premiadas no evento. Com a devida orientação do Dr. José Antônio de Freitas Pacheco (Observatoire de la Côte d'Azur, França),⁶ o projeto tomou um rumo próprio, desenvolvendo pesquisas com parceria do Observatório Nacional⁷ e da rede EXOSS. Hoje, os alunos fazem pesquisas e colaborações nacionais e internacionais. Entre as colaborações nacionais temos: Observatório Nacional e Projeto IMPACTON,⁸ a rede EXOSS, União Brasileira de Astronomia (UBA)⁹, Sociedade Brasileira de Astronomia (SAB)¹⁰, IFES Campus Guarapari, PPGCosmo-UFES e o Núcleo Cosmo-ufes, entre os colaboradores internacionais temos a NASA, através da EXOSS CAMS,¹¹ o projeto Neoshi-

⁴<https://www.ifa.hawaii.edu/research/Pan-STARRS.shtml>.

⁵<http://www.astrometrica.at>.

⁶<https://www.oca.eu/fr>.

⁷<http://www.on.br/index.php/pt-br>.

⁸<http://extranet.on.br/impacton/>.

⁹<https://uba-astronomia.blogspot.com>.

¹⁰<https://sab-astro.org.br>.

¹¹<http://cams.seti.org/FDL/index-EXOSS.html>.

²<http://press.exoss.org>.

³<http://cams.seti.org/FDL/index-EXOSS.html>.

eld 2,¹² com a divulgação do Asteroid Day¹³ nas escolas e o projeto Garatêa-ISS.¹⁴ Subjacente a essas colaborações, existe uma parceria público-privada com a NASA, que busca formas alternativas para proteger a Terra de uma possível extinção em massa.

Esse trabalho é feito por uma equipe de diferentes lideranças mundiais (IMPACTON e NASA, através da EXOSS CAMS, e cientistas da NEOSShield 2) que estuda, e propõe, soluções diferentes para prevenção de uma ameaça teórica onde são feitos estudos e simulações. O objetivo é criar estratégias para eliminação de possíveis ameaças celestes de tamanhos elevados, que possam invadir nossa atmosfera, como asteroides e cometas. Mesmo com pequenas chances de que a Terra possa ser atingida por corpos celestes gigantes, as ameaças são reais.

O projeto “Estamos de Olho no Céu” desenvolvido na EEEM Dr. Silva Mello, colabora com essa iniciativa por meio do monitoramento de certa parte do céu noturno, analisando as imagens e filtrando o que for necessário para os devidos estudos. Nas imagens captadas do céu noturno, coberto pela câmera, são flagrados desde vagalumes a aviões, que, às vezes, têm características de meteoros nas imagens que aparecem durante o vídeo-monitoramento. Esse ruído é considerado um falso positivo e deve ser retirado, manualmente, antes de ser enviado para pesquisas mais aprofundadas. São diversas imagens geradas todos os dias e filtrar essas informações é muito importante para futuras descobertas dos pesquisadores, que têm as imagens e as informações mais rapidamente e mais precisas para realizar seus estudos com segurança.

Os dados espaciais costumam ser massivos, multidimensionais, difíceis e quase impossíveis de analisar por completo. Entre os estudos que são feitos pelos cientistas da Neoshields 2 temos: modelagem do formato de NEOs (Near Earth Objects), aprender mais sobre os cometas misteriosos de longos períodos, traçar a modelagem de suas rotas, observação e estudos de novas chuvas de meteoros (radiantes), mapeamento de superfície de objetos celestes, com o intuito de encontrar água e minerais, buscando formas de utilizar

essa água para possíveis voos espaciais a distâncias maiores [13].

4 Educação informal como consequência

Como terceiro aspecto, temos a educação informal, que não possui intencionalidade, pois é decorrente de momentos não organizados e espontâneos, do dia a dia, durante a interação com familiares amigos e conversas ocasionais. A esse respeito surge a ciência que alcança a população e que, durante a observação, instrui o curioso que leva o conhecimento para a sua comunidade. A informação científica se torna normal na vida da maioria dos alunos que experimenta astronomia no espaço formal e não formal. O espaço informal é consequência do aprendizado e a multiplicação do conhecimento como um hobby e está diretamente ligada à popularização da ciência. Podemos determinar que o objetivo vai além da divulgação, pois são consideradas as necessidades e as expectativas do público-alvo, buscando a curiosidade cultural vasta da astronomia ao divulgar o conhecimento à população. Isso traz uma satisfação própria ao aluno que sente a importância da sua atitude no processo como o centro da comunicação e do ensino naquele momento. Essa divulgação apresenta sempre resultados muito positivos para a segurança na interlocução do aluno, no desenvolvimento da pesquisa e do aprendizado. Segundo Marandino [8], pesquisas na área de ensino de Ciências em espaços não formais são muito escassas, portanto temos poucas referências para nos baseamos. Por esse motivo os resultados obtidos se tornam muito interessantes para os próximos pesquisadores.

O apoio à utilização pedagógica dos espaços não formais e à educação informal atua diretamente no desenvolvimento da cultura científica, momento em que os alunos utilizam, como assunto para os diálogos e as trocas, a ciência aprendida na escola. Alunos que se envolvem nas atividades não formais aprendem a intensificar a necessidade da educação formal, por se tornarem responsáveis por informações confiáveis quando ocorre a informalidade.

Nesse sentido é importante salientar que o campo de educação não escolar (informal e não formal) sempre existiu com o campo de educação escolar, sendo mesmo possível imaginar sinergias pedagógicas muito produtivas e constatar experi-

¹²<https://www.neoshield.eu/science-technology-asteroid-impact/>.

¹³<https://asteroidday.org>.

¹⁴<https://www.garatea.space/projetos/garatea-iss/patch-iss>.

ências com intersecções e complementariedades várias. [14].

Percebemos que, quando os alunos passam as informações, como nas incursões de conscientização do Asteroid Day, a outros alunos em outras escolas, o nível de atenção dos ouvintes é bem maior do que se fosse o mesmo assunto abordado em uma palestra proferida por um professor. Geralmente os alunos ouvintes se projetam nos alunos que estão dando as palestras, assim absorvendo muito mais a informação e transmitindo depois informalmente em sua comunidade. Com relação à participação dos alunos na Mostra de Astronomia do ES, eles foram preparados para explorar ao máximo as atividades no espaço não formal, para que, ao mesmo tempo, aprendessem, transmitissem o conhecimento adquirido ensinando aos curiosos que sempre aparecem.

A Escola Dr. Silva Mello realiza pelo menos cinco incursões em escolas da região por ano, levando informações sobre corpos celestes, conscientizando a população sobre os perigos que podem vir do céu e as ações que temos feito para monitorar e proteger a Terra desses corpos celestes. Em algumas ocasiões, já foram organizadas aulas de campo para que os alunos se reunissem em acampamentos, que ficam em locais com altitude mais adequada, para estudos estelares, para aprimoramento do conhecimento adquirido. Esses momentos são ricos de aprendizagem científica, onde eles têm o conhecimento apresentado por cientistas, ajudando no fortalecimento da vontade ao estudo, pois eles podem interagir e tirar suas dúvidas com especialistas dos mais diversos assuntos do universo. Com essa forma de transmissão de conhecimento, utiliza-se de criatividade para a palestra informal e criam-se formas de tornar essa informalidade em gosto pelo conhecimento e pela ciência.

5 Considerações finais

A utilização do espaço formal geralmente funciona como base para a aquisição do conhecimento. Nesse trabalho, ele funcionou como base para desenvolvimento de atividades em espaços não formais. A aprendizagem em espaços não formais gerou desenvolvimento de pesquisas e atuou em complementaridade à educação formal para aplicação nos projetos desenvolvidos. Diante desse cenário, temos a educação informal como con-

sequência lógica do aprendizado vivenciado, como consequência da participação dos estudantes nas atividades formais e não formais. O apoio ao não formalismo contribui diretamente para aumentar o interesse pela educação formal e informal dos alunos. Alunos que se envolvem nas atividades não formais aprendem a intensificar a necessidade da educação formal, por se tornarem responsáveis por informações confiáveis, quando ocorre a informalidade.

A participação dos alunos nas apresentações de trabalhos na Mostra de Astronomia do ES, sendo usada como espaço de educação não formal para aprendizagem de temas de astronomia, além de envolver a comunidade escolar e promover a interação entre participantes, funcionou como momentos para aprendizagem colaborativa, criando uma rede de conhecimento e pesquisa científica que cresce com novas atividades e novos personagens a cada ano. Os alunos se organizam e mantêm pesquisas e estudos focados nas próximas edições. A MAES, ao ser utilizada como ponte de aprendizado, criou uma vasta célula de multiplicação de saberes aos alunos, o que torna a experiência muito importante na concretização do aprendizado formal exigido no ambiente escolar.

Agradecimentos

A autora agradece à comissão organizadora da MAES e a todos os pesquisadores envolvidos no processo e, em especial a José Antônio de Freitas Pacheco (Observatoire de la Côte d'Azur, França), Júlio César Fabris (Cosmo-ufes), Adriano Mesquita Oliveira (IFES-Guarapari), ao diretor da EEEM Dr. Silva Mello, Frederico Feital, à Daniela Lazzaro (ON), ao CNPq, ao grupo EXOSS Citizen Science, que não mediram esforços para garantir a implantação e o desenvolvimento das ações que resultaram no sucesso do projeto, e aos alunos, que tanto têm se dedicado ao crescimento deste .

Sobre a autora

Lucia Helena Horta Oliveira (lucia-horta@hotmail.com) tem mestrado em ensino de física pelo IFES (2020) e é professora da EEEM Dr. Silva Mello (Secretaria de Educação do Estado do Espírito Santo) em Guarapari, ES. É co-organizadora da Mostra de Astronomia do Espírito Santo.

Referências

- [1] M.R. Silva e M.H.S. Carneiro, *Popularização da Ciência: Análise de uma situação não-formal de Ensino*, in *Anais da 29^a Reunião Anual da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Educação* (Anped, Caxambu, 2006).
- [2] V. S. Vieira, *Análise de espaços não formais e sua contribuição para o ensino de Ciências*, Tese de doutorado, Instituto de Bioquímica Médica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (2005).
- [3] G.A. Gouvêa, *A divulgação científica para crianças: o caso da Ciência Hoje das Crianças*, Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2000).
- [4] M. Marandino, R. V. M. Silveira, M. J. Chelini, M. J. Fernandes, V. Rachid, L. C. Martins, M. F. Lourenço, J. A. Fernandes e H. A. Florentino, *A Educação não formal e a Divulgação Científica: o que pensa quem faz?*, in *Atas do IV Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências*, editado por M. A. Moreira (ABRAPEC, Bauru, 2004).
- [5] P. Freire, *Pedagogia da autonomia: saberes necessários à prática educativa* (Paz e Terra, São Paulo, 2011).
- [6] G. Queiroz et al., *Construindo saberes da mediação na educação em museus de Ciências: o caso dos mediadores do museu de astronomia e Ciências afins/Brasil*, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*, **2**, 77-88 (2002).
- [7] G. Gouvêa, M. Marandino, D. Patti do Amaral, *A ciência, o brincar e os espaços não formais de educação*, in *21^a Reunião Anual da ANPED* (1998).
- [8] M. Marandino, *Museu e escola: parceiros na educação científica do cidadão*, in *Reinventar a escola*, editado por V.M. Candau (Vozes, Petrópolis, 2000).
- [9] S. R. P. Pivelli, *Análise do potencial pedagógico de espaços não formais de ensino para o desenvolvimento da temática da biodiversidade e sua conservação*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Educação-USP (2006).
- [10] S. R. Pivelli e C. S. Kawasaki, *Análise do potencial pedagógico de espaços não formais de ensino para o desenvolvimento da temática da biodiversidade e sua conservação*, in *Atas do V Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*, editado por R. Nardi e O. Borges (ABRAPEC, Bauru, 2006).
- [11] S. C. B. Rocha, A. Fachín-Terán, *O uso de espaços não formais como estratégia para o ensino de Ciências* (UEA/Escola Normal Superior/PPGEECA, Manaus, 2010).
- [12] EXOSS se torna agente Neoshield-2 no Brasil, *EXOSS Citizen Science Project* (2018), disponível em <http://press.exoss.org/exoss-se-torna-agente-neoshield-2-no-brasil/> (acesso em 28 mar. 2020).
- [13] SETI Institute, *2017 FDL Talk - Team 1: Planetary Defense: Long Period Comets (SETI Talks 2017)* (2017), disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=foB9y1uhn6I> (acesso em 28 mar. 2020).
- [14] O. R. M. von Simson, M. B. Park, R. S. Fernandes, *Educação não formal: cenários da criação* (Editora da Unicamp/Centro de Memória, Campinas, 2001).

O artigo fundador da teoria da relatividade restrita

Oliver F. Piattella

Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo

Apresenta-se uma tradução direta do alemão ao português do icônico artigo de Albert Einstein que apresentou à comunidade científica a teoria da relatividade especial.

Abstract

It is presented a direct translation, from German to Brazilian Portuguese, of the seminal work by Albert Einstein, where the theory of special relativity is introduced to the scientific community.

Palavras-chave: Einstein, relatividade especial.

Keywords: Einstein, special relativity.

DOI: [10.47083/Cad.Astro.v1n1.31681](https://doi.org/10.47083/Cad.Astro.v1n1.31681)

1 Introdução

O texto apresentado a seguir é a tradução, do alemão ao português, do importante artigo de Albert Einstein de 1905, “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, no qual o físico de Ulm introduz a teoria da relatividade restrita e a sua aplicação à eletrodinâmica. A ideia de apresentar este texto, e outros similares, nos Cadernos de Astronomia é a de tornar acessíveis para um público maior possível as contribuições científicas que marcaram a história, mostrando elas nas suas formas originais, ainda não “processadas e industrializadas” na forma de livros-texto. Naturalmente, nem todas as contribuições fundamentais da ciência são acessíveis ao grande público, sendo muitas delas técnicas demais; porém outras, como no caso de “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento”, são suficientemente simples para serem acompanhadas e entendidas por alunos do ensino médio, e isso é surpreendente se conside-

ramos quanto esses trabalhos sejam pioneiros e tenham marcado a história da física.

A tradução foi feita diretamente do alemão. Também buscou-se conservar a diagramação utilizada pela revista *Annalen der Physik*, que primeiro publicou a obra que aqui se traduz.

Boa leitura!

Sobre o autor

Oliver F. Piattella (oliver.piattella@cosmo-ufes.org) se formou e se doutorou pela Università dell’Insubria, Como, Itália em 2010. Tornou-se professor adjunto da UFES em 2012. É pesquisador do CNPq e atua nas áreas de cosmologia e gravitação. Publicou 54 artigos científicos e um livro texto de cosmologia intitulado “Introduction to Cosmology”.

3. Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento¹

por A. Einstein

Que a eletrodinâmica de Maxwell - como a mesma hoje em dia é compreendida - na sua aplicação a corpos em movimento leve a assimetrias que parecem não estar relacionadas aos fenômenos, é conhecido. Se pense, por exemplo, à interação eletrodinâmica entre um ímã e um condutor. O fenômeno observável depende aqui somente do movimento relativo entre condutor e ímã, enquanto, no entendimento comum, os dois casos, que um ou o outro destes corpos esteja em movimento, têm que ser rigorosamente separados entre si. De fato, estando o ímã em movimento e o condutor em repouso, produz-se no entorno do ímã um campo elétrico com um certo valor de energia, que, nas regiões onde se encontram partes do condutor, dá origem a uma corrente elétrica. Porém, estando o ímã em repouso e movimentando-se o condutor, não gera-se então nos arredores do ímã nenhum campo elétrico, mas gera-se, por outro lado, no condutor uma força eletromotriz, à qual não corresponde uma energia, mas que - pressuposta a igualdade do movimento relativo para os dois casos considerados - dá origem a correntes elétricas do mesmo tamanho e com a mesma direção, como as produzidas no primeiro caso pelas forças elétricas.

Exemplos do mesmo tipo, assim como as tentativas sem sucesso de detectar um movimento da Terra relativo ao “meio de propagação da luz”, levam à hipótese que nenhuma característica dos fenômenos correspondem ao conceito de repouso absoluto, não somente na mecânica mas também na eletrodinâmica, mas que, ainda mais, para todos os sistemas de coordenadas para os quais as equações da Mecânica valem, também as mesmas leis da eletrodinâmica e da ótica são válidas, como isso já tem sido provado para quantidades de primeira ordem. Queremos elevar esta hipótese (cujo conteúdo será chamado doravante “princípio de relatividade”) para postulado e além disto incluir o postulado, aparentemente incompatível com o primeiro, que a luz propaga no espaço vazio sempre com uma determinada velocidade V , independente do estado de movimento do corpo que a emite. Estes dois postulados são suficientes para chegar numa eletrodinâmica dos corpos em movimento simples e livre de contradições com base na teoria Maxwelliana para corpos em repouso. A introdução de um “éter da luz” se revelará desnecessária, pois, segundo a interpretação a ser desenvolvida aqui, não introduz-se um “espaço de repouso absoluto” dotado de propriedades extraordinárias e nem associa-se um vetor velocidade a um ponto do espaço vazio em que processos eletromagnéticos ocorrem.

A teoria a ser desenvolvida baseia-se - como toda outra teoria da eletrodinâmica - na cinemática dos corpos rígidos, pois as afirmações de cada teoria interessam relações entre corpos rígidos (sistemas de coordenadas), relógios, e processos eletromagnéticos. A falta de consideração desta circunstância é a raiz das dificuldades com as quais a eletrodinâmica dos corpos em movimento tem que lutar no momento.

II. Parte cinemática.

§ 1. Definição da simultaneidade.

Se considere um sistema de coordenadas em que as equações da mecânica newtoniana sejam válidas. Chamamos este sistema de coordenadas de “sistema de repouso” para distingui-lo em palavras de outros sistemas de coordenadas a serem introduzidos mais à frente, e para uma sua precisa representação. Se um ponto material está em repouso com relação a este sistema de coordenadas, então a sua posição com relação a ele pode ser determinada por meio de réguas rígidas e o uso dos métodos da geometria euclidiana, e ser expressada em coordenadas cartesianas.

¹Título original: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*. Publicado em: *Annalen der Physik* 17 (1905): 891–921. O número 3 ao lado do título do artigo refere-se ao fato que o mesmo é o terceiro compondo esse volume dos *Annalen der Physik*. Traduzido por Oliver F. Piattella.

Se queremos descrever *o movimento* de um ponto material, damos os valores das suas coordenadas em função do tempo. Agora, é bom ficar atentos ao fato que uma tal descrição matemática possui sentido físico somente se antes tem se tornado claro o que aqui se entende com “tempo”. Temos que tomar em conta que todas as nossas asserções em que o tempo desempenha um papel, são sempre asserções sobre *eventos simultâneos*. Quando digo por exemplo: “Esse trem chega aqui às 7 horas”, isto quer dizer algo do tipo: “O ponteiro menor do meu relógio indicar o 7 e a chegada do trem são eventos simultâneos”.²

Poderia parecer que todas as dificuldades que a definição de “tempo” encontra possam ser superadas se, em lugar de “tempo”, uso “a posição do ponteiro pequeno do meu relógio”. Uma tal definição é de fato suficiente quando trata-se de definir um tempo exclusivamente para o lugar em que se encontra o relógio; a definição porém não é mais suficiente assim que se tratar de interligar temporalmente uma série de eventos que ocorrem em lugares diferentes, ou - equivalentemente - avaliar temporalmente eventos que ocorrem em lugares afastados do relógio.

Nós poderíamos, por outro lado, nos limitar a avaliar temporalmente os eventos por meio de um observador que se encontra na origem do sistema de coordenadas juntamente ao relógio, e que associa a correspondente posição dos ponteiros do relógio para cada sinal luminoso que representa um evento a ser avaliado e que chega até ele através o espaço vazio. Uma tal associação, porém, traz consigo o inconveniente de que ela não é independente do ponto de vista do observador dotado do relógio, como nós sabemos por experiência. Chegamos a uma determinação muito mais prática por meio da seguinte consideração.

No ponto A do espaço se encontra um relógio, e assim um observador que se encontra em A pode avaliar temporalmente eventos que acontecem na imediata proximidade de A procurando a posição dos ponteiros do relógio que é simultânea com esses eventos. Também no ponto B do espaço se encontra um relógio - queremos acrescentar “um relógio realizado exatamente da mesma forma como o relógio que se encontra em A ” - então uma avaliação temporal dos eventos é possível também no imediato entorno de B por um observador que se encontra em B . Não é porém possível, sem uma ulterior imposição, comparar temporalmente um evento em A com um evento em B ; até o momento temos definido somente um “tempo- A ” e um “tempo- B ”, mas não um tempo conjunto para A e B . Este último tempo pode agora ser determinado estabelecendo *por definição* que o “tempo” que a luz precisa para chegar de A a B é igual ao “tempo” que ela precisa para chegar de B a A . Isto é, um raio de luz sai de A para B no “tempo- A ” t_A , é refletido em B para A num “tempo- B ” t_B e chega de volta em A no “tempo- A ” t'_A . Os dois relógios estão sincronizados, por definição, se:³

$$t_B - t_A = t'_A - t_B . \quad (1)$$

Supomos que esta definição de sincronismo seja possível de uma maneira livre de contradições, e certamente para muitos pontos arbitrários, e que então sejam válidas, em geral, as relações:

1. Se o relógio em B está sincronizado com o relógio em A , então o relógio em A está sincronizado com o relógio em B .
2. Se o relógio em A está sincronizado tanto com o relógio em B como também com o relógio em C , então os relógios em B e em C estão também sincronizados entre eles.

Nós temos então estabelecido, com o auxílio de uma certa experiência física (pensada), o que entende-se por relógios sincronizados que se encontram em repouso em lugares diferentes, e com isso, evidentemente, temos ganhado uma definição de “simultaneidade” e “tempo”. O “tempo” de um evento é a indicação, simultânea ao evento, de um relógio que se encontra em repouso no lugar do evento e que está sincronizado com um determinado relógio em repouso, e com este claramente se mantém sincronizado para todas as determinações de tempo.

²A imprecisão que está por trás do conceito de simultaneidade de dois eventos que ocorrem (aproximadamente) no mesmo lugar, que igualmente deve ser superada por meio de uma abstração, não será discutida aqui.

³[N.d.T.] No artigo original de Einstein as equações não são numeradas. Eu preferi numerá-las aqui para tornar mais práticas eventuais discussões em sala de aula.

Com base na experiência podemos também estabelecer que a grandeza:

$$\frac{2\overline{AB}}{t'_A - t_A} = V \quad (2)$$

é uma constante universal (a velocidade da luz no vácuo).

É essencial que tenhamos definido o tempo por meio de relógios em repouso num sistema em repouso; nós chamamos esse tempo que acabamos de definir “o tempo do sistema de repouso” por causa do fato que pertence ao sistema de repouso.

§ 2. Sobre a relatividade dos comprimentos e dos tempos.

As seguintes considerações baseiam-se no princípio de relatividade e no princípio da constância da velocidade da luz, que definimos da seguinte maneira.

1. As leis segundo as quais os estados dos sistemas físicos mudam são independentes de qual de dois sistemas de coordenadas, que se encontram em movimento translacional uniforme um relativo ao outro, se usa para descrever essas mudanças.

2. Cada raio de luz movimenta-se num sistema de coordenadas “em repouso” com a velocidade definida V , independentemente se este raio de luz é emitido por um corpo em repouso ou em movimento. Com relação a isso tem-se

$$\text{Velocidade} = \frac{\text{Caminho percorrido pela luz}}{\text{Intervalo temporal}}, \quad (3)$$

onde “intervalo temporal” é para ser entendido no sentido da definição do § 1.

Seja dado um bastão rígido em repouso; o mesmo possui um comprimento l , medido com uma régua também em repouso. Imaginamos agora que o eixo do bastão fique no eixo X do sistema de coordenadas de repouso e após isso conferimos ao bastão um movimento de translação paralela uniforme (com velocidade v) ao longo do eixo X no sentido de x crescente. Investigamos agora sobre o comprimento do bastão *em movimento*, que imaginamos calculado através das duas seguintes operações:

a) O observador se movimenta, junto à régua acima mencionada, com o bastão a ser medido e mede o comprimento deste diretamente, encostando a régua, assim como se o bastão a ser medido, a régua e o observador estivessem em repouso.

b) O observador determina num determinado tempo t , por meio de relógios em repouso, posicionados no sistema de repouso e sincronizados conforme ao § 1, em quais pontos do sistema de repouso se encontram as extremidades do bastão a ser medido.

A distância entre as extremidades, medida com a régua já utilizada, mas desta vez em repouso, é também um comprimento que pode-se definir como “comprimento do bastão”.

Segundo o princípio de relatividade o comprimento encontrado por meio do procedimento a), que chamamos de “comprimento do bastão no sistema em movimento”, deve ser igual ao comprimento l do bastão em repouso.

Determinaremos, com base nos nossos dois princípios, o comprimento a ser encontrado por meio do procedimento b), que chamamos “o comprimento do bastão (em movimento) no sistema de repouso”, e encontraremos que esse é diferente de l .

A cinemática usada habitualmente supõe tacitamente que os comprimentos determinados por meio dos dois procedimentos acima sejam exatamente iguais um com outro, ou, em outras palavras, que no instante de tempo t um corpo rígido em movimento seja geometricamente completamente substituível pelo *mesmo* corpo, quando ele *está em repouso* numa certa posição.

Além disso, imaginamos relógios fixados às duas extremidades do bastão (A e B), que sejam sincronizados com os relógios do sistema de repouso, isto é, cujos dados correspondem cada vez ao “tempo do sistema de repouso” nos lugares em que eles momentaneamente se encontram; esses relógios são então “sincronizados no sistema de repouso”.

Imaginamos também que com cada relógio se encontre um observador em movimento com ele e que estes observadores usam em ambos os relógios o critério formulado no § 1 para o andamento sincronizado. No tempo⁴ t_A sai um raio de luz de A , é refletido no tempo t_B em B , e chega de volta em A no tempo t'_A . Com base no princípio da constância da velocidade da luz encontramos:

$$t_B - t_A = \frac{r_{AB}}{V - v} \quad (4)$$

e

$$t'_A - t_B = \frac{r_{AB}}{V + v}, \quad (5)$$

onde r_{AB} representa o comprimento do bastão em repouso - medido no sistema de repouso. Observadores em movimento juntamente ao bastão em movimento encontrariam então que os dois relógios não são sincronizados, enquanto observadores que se encontram no sistema de repouso declarariam que os relógios são sincronizados.

Vemos então que não podemos atribuir ao conceito da simultaneidade nenhum significado *absoluto*, mas que dois eventos, que, examinados de um sistema de coordenadas, são simultâneos, examinados de um sistema em movimento relativo a este, não podem mais ser considerados como eventos simultâneos.

§ 3. Teoria da transformação das coordenadas e do tempo do sistema de repouso para um sistema que se encontra com relação a este em movimento translacional uniforme.

Sejam dados no espaço “em repouso” dois sistemas de coordenadas, ou seja, dois sistemas cada um com três linhas materiais, ortogonais entre si, que saem de um ponto. Os eixos X dos dois sistemas podem coincidir, e os seus eixos Y e Z podem ser respectivamente paralelos. Cada sistema seja providenciado com uma régua rígida e um certo número de relógios, e sejam as duas régua, assim como todos os relógios dos dois sistemas, exatamente idênticos uns com os outros.

Seja conferida agora à origem de um dos dois sistemas (k) uma velocidade v (constante) na direção de x crescente do outro sistema em repouso (K), e que essa velocidade possa se comunicar também aos eixos coordenados, à relativa régua assim como aos relógios. A cada tempo t do sistema de repouso K corresponde então uma determinada posição dos eixos do sistema em movimento e, por razões de simetria, somos autorizados a supor que o movimento de k possa ser realizado de um jeito tal que os eixos do sistema em movimento sejam no tempo t (com “ t ” sempre é indicado um tempo do sistema de repouso) paralelos aos eixos do sistema em repouso.

Imaginamos agora de medir o espaço seja no sistema de repouso K , por meio da régua em repouso, seja também no sistema em movimento k , por meio da régua em movimento com ele, e então imaginamos determinadas as coordenadas x, y, z e ξ, η, ζ , respectivamente. Além disso, o tempo t do sistema de repouso seja determinado para todos os pontos desse sistema por meio de relógios em repouso que se encontram nestes pontos, através sinais luminosos, na maneira explicada no § 1; da mesma forma seja determinado o tempo τ do sistema em movimento, para todos os seus pontos em que se encontram relógios em repouso com relação a ele, através o uso do método mencionado no § 1, trocando sinais de luz entre os pontos nos quais se encontram os mencionados relógios.

Para cada conjunto de valores x, y, z, t , que determina completamente posição e tempo de um evento no sistema de repouso, corresponde um conjunto de valores ξ, η, ζ, τ que determina aquele evento relativamente ao sistema k , e agora a tarefa a ser resolvida é de encontrar o sistema de equações que relaciona essas quantidades.

Primeiramente, é claro que as equações devem ser *lineares*, devido à propriedade de homogeneidade que atribuímos ao espaço e ao tempo.

Se colocamos $x' = x - vt$, é claro assim que a um ponto em repouso no sistema k pertence um sistema de valores x', y, z determinado e independente do tempo. Determinamos primeiramente τ como função

⁴“Tempo” significa aqui “tempo do sistema de repouso” e, também, “posição dos ponteiros do relógio em movimento, que se encontra no lugar em questão”.

de x', y, z e t . Para este propósito temos que expressar nas equações que τ não é outra coisa que a incarnação dos dados dos relógios em repouso no sistema k , que têm sido sincronizados de acordo com a regra dada no § 1.

Seja enviado da origem do sistema k um raio de luz no tempo τ_0 ao longo do eixo X para x' e de lá no tempo τ_1 refletido para a origem das coordenadas, onde chega no tempo τ_2 ; então tem que ser que:

$$\frac{1}{2}(\tau_0 + \tau_2) = \tau_1 \quad (6)$$

ou, incluindo os argumentos da função τ e usando o princípio da constância da velocidade da luz no sistema de repouso:

$$\frac{1}{2} \left[\tau(0, 0, 0, t) + \tau \left(0, 0, 0, \left\{ t + \frac{x'}{V-v} + \frac{x'}{V+v} \right\} \right) \right] = \tau \left(x', 0, 0, t + \frac{x'}{V-v} \right). \quad (7)$$

Daqui segue, escolhendo x' indefinidamente pequeno:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{V-v} + \frac{1}{V+v} \right) \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{1}{V-v} \frac{\partial \tau}{\partial t}, \quad (8)$$

ou

$$\frac{\partial \tau}{\partial x'} + \frac{v}{V^2 - v^2} \frac{\partial \tau}{\partial t} = 0. \quad (9)$$

Tem que ser ressaltado que em lugar da origem das coordenadas poderíamos ter escolhido qualquer outro ponto como ponto de saída do raio de luz e, por isso, a equação agora obtida vale para todos os valores de x', y, z .

Um raciocínio análogo - aplicado aos eixos H e Z - resulta, considerando que a luz observada do sistema de repouso propaga-se ao longo destes eixos sempre com a velocidade $\sqrt{V^2 - v^2}$, em:

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial z} = 0. \quad (11)$$

Como τ é uma função *linear*, segue dessas equações que:

$$\tau = a \left(t - \frac{v}{V^2 - v^2} x' \right), \quad (12)$$

onde a é uma função $\varphi(v)$ por enquanto desconhecida e, por brevidade, é assumido que na origem de k para $\tau = 0$ seja $t = 0$.

Com a ajuda deste resultado é fácil determinar as quantidades ξ, η, ζ , expressando em equações que a luz, medida no sistema em movimento, também propaga-se com velocidade V (como requer o princípio da constância da velocidade da luz em concomitância com o princípio de relatividade). Para um raio de luz emitido no tempo $\tau = 0$ na direção de ξ crescente vale:

$$\xi = V\tau, \quad (13)$$

ou

$$\xi = aV \left(t - \frac{v}{V^2 - v^2} x' \right). \quad (14)$$

Agora, o raio de luz se movimenta relativamente à origem de k com velocidade $V - v$, medida no sistema de repouso, assim que vale:

$$\frac{x'}{V - v} = t. \quad (15)$$

Inserimos este valor de t na equação para ξ e obtemos então:

$$\xi = a \frac{V^2}{V^2 - v^2} x' . \quad (16)$$

Da mesma forma, encontramos através a análise de raios de luz que se movimentam ao longo de ambos os outros eixos:

$$\eta = V\tau = aV \left(t - \frac{v}{V^2 - v^2} x' \right) , \quad (17)$$

onde

$$\frac{y}{\sqrt{V^2 - v^2}} = t ; \quad x' = 0 ; \quad (18)$$

então

$$\eta = a \frac{V}{\sqrt{V^2 - v^2}} y \quad (19)$$

e

$$\zeta = a \frac{V}{\sqrt{V^2 - v^2}} z . \quad (20)$$

Substituímos para x' o seu valor, assim obtemos:

$$\tau = \varphi(v)\beta \left(t - \frac{v}{V^2} x \right) , \quad (21)$$

$$\xi = \varphi(v)\beta(x - vt) , \quad (22)$$

$$\eta = \varphi(v)y , \quad (23)$$

$$\zeta = \varphi(v)z , \quad (24)$$

onde

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \quad (25)$$

e φ é uma função de v por enquanto desconhecida. Não fazendo nenhuma hipótese sobre a posição inicial do sistema em movimento e sobre o ponto zero de τ , teria-se então que acrescentar a cada lado direito destas equações uma constante aditiva.

Temos agora que provar que cada raio de luz, medido no sistema em movimento, propaga-se com velocidade V , caso isso aconteça no sistema de repouso, como temos postulado; de fato, não temos ainda fornecido a prova que o princípio da constância da velocidade da luz é compatível com o princípio de relatividade.

No tempo $t = \tau = 0$ seja enviado da origem das coordenadas de ambos os sistemas, que neste tempo coincidem, uma onda esférica que propaga-se no sistema K com a velocidade V . Se (x, y, z) é um ponto que acaba de ser alcançado por esta onda, então tem-se

$$x^2 + y^2 + z^2 = V^2 t^2 . \quad (26)$$

Transformamos esta equação com a ajuda das nossas equações de transformação e obtemos, após um cálculo simples:

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = V^2 \tau^2 . \quad (27)$$

A onda considerada é então uma onda esférica com velocidade de propagação V também quando observada no sistema em movimento. Portanto, é mostrado que ambos os nossos princípios fundamentais são compatíveis um com outro.

Nas equações de transformação desenvolvidas aparece ainda uma função desconhecida φ de v que queremos agora determinar.

Introduzimos para este escopo ainda um terceiro sistema de coordenadas K' que seja concebido em movimento translacional paralelo ao eixo Ξ do sistema k de tal forma que a origem das coordenadas

de K' se movimenta com velocidade $-v$ ao longo do eixo Ξ . No tempo $t = 0$ coincidam todas as três origens das coordenadas e seja para $t = x = y = z = 0$ o tempo t' do sistema K' igual a zero. Chamamos de x', y', z' as coordenadas medidas no sistema K' e obtemos, usando duas vezes as nossas equações de transformação:

$$t' = \varphi(-v)\beta(-v) \left\{ \tau + \frac{v}{V^2}\xi \right\} = \varphi(v)\varphi(-v)t, \quad (28)$$

$$x' = \varphi(-v)\beta(-v)\{\xi + v\tau\} = \varphi(v)\varphi(-v)x, \quad (29)$$

$$y' = \varphi(-v)\eta = \varphi(v)\varphi(-v)y, \quad (30)$$

$$z' = \varphi(-v)\zeta = \varphi(v)\varphi(-v)z. \quad (31)$$

Como as relações entre x', y', z' e x, y, z não contêm o tempo t , os sistemas K e K' estão então em repouso relativo e é claro que a transformação de K para K' deva ser a transformação identidade. Tem-se então:

$$\varphi(v)\varphi(-v) = 1. \quad (32)$$

Agora investigamos o significado de $\varphi(v)$. Focamos na porção do eixo H do sistema k que fica entre $\xi = 0, \eta = 0, \zeta = 0$ e $\xi = 0, \eta = l, \zeta = 0$. Esta parte do eixo H é como um bastão em movimento relativo ao sistema K com velocidade v ortogonal ao próprio eixo, cujas extremidades possuem em K as coordenadas:

$$x_1 = vt, \quad y_1 = \frac{l}{\varphi(v)}, \quad z_1 = 0 \quad (33)$$

e

$$x_2 = vt, \quad y_2 = 0, \quad z_2 = 0. \quad (34)$$

O comprimento do bastão medido em K é então $l/\varphi(v)$; esse é o significado da função φ . Por razões de simetria é agora plausível que o comprimento, medido no sistema de repouso, de um dado bastão, que está em movimento ortogonalmente ao próprio eixo, possa ser dependente somente da velocidade, mas não da direção e do sentido do movimento. Então, o comprimento do bastão em movimento, medido no sistema de repouso, não muda se v é trocado por $-v$. Daqui segue:

$$\frac{l}{\varphi(v)} = \frac{l}{\varphi(-v)}, \quad (35)$$

ou

$$\varphi(v) = \varphi(-v). \quad (36)$$

Desta, e da relação encontrada há pouco, segue que deve ser $\varphi(v) = 1$, assim que as equações de transformação encontradas passam a ser:

$$\tau = \beta \left(t - \frac{v}{V^2}x \right), \quad (37)$$

$$\xi = \beta(x - vt), \quad (38)$$

$$\eta = y, \quad (39)$$

$$\zeta = z, \quad (40)$$

onde

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}, \quad (41)$$

§ 4. Significado físico das equações obtidas, interessando corpos rígidos em movimento e relógios em movimento.

Examinamos uma esfera rígida⁵ de raio R , que está em repouso relativamente ao sistema em movimento k , e cujo centro está na origem das coordenadas de k . A equação da superfície desta esfera, que

⁵Isto é, um corpo que possui a forma de uma esfera, quando analisado em repouso.

se movimenta com velocidade v relativamente ao sistema K , é:

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = R^2. \quad (42)$$

A equação desta superfície, expressada em x, y, z no tempo $t = 0$ é:

$$\frac{x^2}{\left(\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}\right)^2} + y^2 + z^2 = R^2. \quad (43)$$

Um corpo rígido que, medido em estado de repouso, tem a forma de uma esfera, tem então, em estado de movimento - analisado do sistema de repouso - a forma de um elipsoide de rotação com eixos:

$$R\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}, R, R. \quad (44)$$

Enquanto as dimensões Y e Z da esfera (e também de cada corpo rígido de forma arbitrária) aparecem então não mudadas pelo movimento, a dimensão X aparece encurtada na razão $1 : \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}$, e então mais fortemente encurtada à medida que v for maior. Para $v = V$ todos os objetos em movimento - analisados do sistema “de repouso” - encolhem em estruturas planas. Para velocidades super-luminais os nossos raciocínios se tornam sem sentido; por outro lado, encontraremos nas seguintes considerações que a velocidade da luz desempenha na nossa teoria física o papel de velocidades infinitamente grandes.

É claro que os mesmos resultados valem para corpos em repouso no sistema de “repouso”, quando são observados de um sistema em movimento uniforme. -

Pensamos, além disso, que um dos relógios, os quais são capazes de fornecer o tempo t estando em repouso relativo ao sistema de repouso, e o tempo τ estando em repouso relativo ao sistema em movimento, esteja na origem das coordenadas de k e configurado de um jeito tal que apresente o tempo τ . O quão rápido vai este relógio, quando observado do sistema em repouso?

Entre as grandezas x, t e τ , que se referem à posição deste relógio, valem evidentemente as equações:

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \left(t - \frac{v}{V^2}x\right) \quad (45)$$

e

$$x = vt. \quad (46)$$

Então temos

$$\tau = t\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2} = t - \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}\right)t, \quad (47)$$

de onde segue que a leitura do relógio (observado no sistema de repouso) por cada segundo fica atrás de $(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2})$ segundos, ou de $\frac{1}{2}(v/V)^2$ segundos - negligenciando grandezas de quarta ordem e superiores.

Daqui resulta a seguinte consequência peculiar. Sejam dados nos pontos A e B de K relógios sincronizados em repouso, quando observados do sistema de repouso, e movimente-se o relógio A com velocidade v na direção de B ao longo da linha que une os dois, assim, depois da chegada desse relógio em B , os dois não estão mais sincronizados, mas o relógio que foi deslocado de A para B atrasa de $\frac{1}{2}tv^2/V^2$ segundos (negligenciando quantidades de quarta ordem e superiores) com relação ao que desde o começo se encontra em B , onde t é o tempo que o relógio precisa para ir de A até B .

Se vê imediatamente que este resultado continua valendo também se o relógio se movimentar de A para B numa linha poligonal arbitrária e até se os pontos A e B coincidem.

Admitindo que o resultado mostrado para uma linha poligonal seja válido também para um linha curva contínua, obtém-se então a afirmação: se em A se encontram dois relógios sincronizados e se

movimenta um dos dois com velocidade constante ao longo de uma curva fechada até que ele volte novamente em A , o que leva, digamos, t segundos, então atrasa este último relógio, na sua chegada em A com relação ao que ficou parado, de $\frac{1}{2}t(v/V)^2$ segundos. Conclui-se que um relógio a roda de balanço que se encontra no equador terrestre deve correr um pouco mais lentamente de um relógio, exatamente idêntico e sujeito às mesmas condições, que se encontra num dos polos terrestres.

§ 5. Teorema de adição das velocidades.

No sistema k em movimento com velocidade v ao longo do eixo X do sistema K movimenta-se um ponto de acordo com as equações:

$$\xi = w_\xi \tau \quad (48)$$

$$\eta = w_\eta \tau, \quad (49)$$

$$\zeta = 0, \quad (50)$$

onde w_ξ e w_η são constantes.

Procura-se o movimento do ponto relativamente ao sistema K . Introduzindo as quantidades x, y, z, t nas equações de movimento do ponto, e com ajuda das equações de transformação desenvolvidas no § 3, obtêm-se:

$$x = \frac{w_\xi + v}{1 + \frac{vw_\xi}{V^2}} t, \quad (51)$$

$$y = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}{1 + \frac{vw_\xi}{V^2}} w_\eta t, \quad (52)$$

$$z = 0. \quad (53)$$

A lei do paralelogramo aplicada às velocidades vale então, conforme nossa teoria, somente em primeira aproximação. Colocamos:

$$U^2 = \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2, \quad (54)$$

$$w^2 = w_\xi^2 + w_\eta^2 \quad (55)$$

e

$$\alpha = \arctg \frac{w_y}{w_x}; \quad (56)$$

α tem que ser enxergado então como o ângulo entre as velocidades v e w . Após uma simples conta resulta:

$$U = \frac{\sqrt{(v^2 + w^2 + 2vw \cos \alpha) - \left(\frac{vw \sin \alpha}{V}\right)^2}}{1 + \frac{vw \cos \alpha}{V^2}}. \quad (57)$$

É notável que v e w entrem de maneira simétrica na expressão para a velocidade resultante. Se w tem também direção do eixo X (eixo Ξ) obtemos:

$$U = \frac{v + w}{1 + \frac{vw}{V^2}}. \quad (58)$$

Dessa equação segue que da composição de duas velocidades, que são menores de V , resulta sempre uma velocidade menor que V . De fato colocando $v = V - \chi$, $w = V - \lambda$, onde χ e λ são positivos e menores que V , tem-se:

$$U = V \frac{2V - \chi - \lambda}{2V - \chi - \lambda + \frac{\chi\lambda}{V}} < V. \quad (59)$$

Além disso segue que a velocidade da luz V não pode ser mudada pela composição com uma “velocidade subluminal”. Para este caso obtém-se:

$$U = \frac{V + w}{1 + \frac{w}{V}} = V. \quad (60)$$

Poderíamos ter obtido a fórmula para U , no caso em que v e w possuam a mesma direção, também através a combinação de duas transformações, de acordo com o § 3. Introduzimos junto aos sistemas K e k que aparecem no § 3 ainda um terceiro sistema k' em movimento paralelo com relação a k , cuja origem se movimenta ao longo do eixo Ξ com velocidade w . Assim obtemos equações entre as grandezas x, y, z, t e as correspondentes grandezas de k' , que se distinguem das encontradas no § 3 somente pelo fato que em lugar de “ v ” entra a grandeza

$$\frac{v + w}{1 + \frac{vw}{V^2}}; \quad (61)$$

Disso se vê que tais transformações paralelas formam um grupo - como tem que ser.

Temos derivado as necessárias proposições da cinemática correspondente aos nossos dois princípios e passamos agora a mostrar o uso delas na eletrodinâmica.

III. Parte eletrodinâmica.

§ 6. Transformação das equações de Maxwell-Hertz para o espaço vazio. Sobre a natureza das forças eletromotrizes que surgem do movimento num campo magnético.

Sejam as equações de Maxwell-Hertz para o espaço vazio válidas para o sistema de repouso K , então seja:

$$\frac{1}{V} \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial N}{\partial y} - \frac{\partial M}{\partial z}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial y}, \quad (62)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial L}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial z}, \quad (63)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial Z}{\partial t} = \frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial L}{\partial y}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial x}, \quad (64)$$

onde (X, Y, Z) representa o vetor da força elétrica e (L, M, N) o da força magnética.

Usando nestas equações as transformações desenvolvidas no § 3, no sentido que relacionamos os processos eletromagnéticos ao sistema de coordenadas em movimento com velocidade v lá introduzido,

obtemos então as equações:

$$\frac{1}{V} \frac{\partial X}{\partial \tau} = \frac{\partial \beta \left(N - \frac{v}{V} Y \right)}{\partial \eta} - \frac{\partial \beta \left(M + \frac{v}{V} Z \right)}{\partial \zeta}, \quad (65)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \beta \left(Y - \frac{v}{V} N \right)}{\partial \tau} = \frac{\partial L}{\partial \zeta} - \frac{\partial \beta \left(N - \frac{v}{V} Y \right)}{\partial \xi}, \quad (66)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \beta \left(Z + \frac{v}{V} M \right)}{\partial \tau} = \frac{\partial \beta \left(M + \frac{v}{V} Z \right)}{\partial \xi} - \frac{\partial L}{\partial \eta}, \quad (67)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial L}{\partial \tau} = \frac{\partial \beta \left(Y - \frac{v}{V} N \right)}{\partial \zeta} - \frac{\partial \beta \left(Z + \frac{v}{V} M \right)}{\partial \eta}, \quad (68)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \beta \left(M + \frac{v}{V} Z \right)}{\partial \tau} = \frac{\partial \beta \left(Z + \frac{v}{V} M \right)}{\partial \xi} - \frac{\partial X}{\partial \zeta}, \quad (69)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial \beta \left(N - \frac{v}{V} Y \right)}{\partial \tau} = \frac{\partial X}{\partial \eta} - \frac{\partial \beta \left(Y - \frac{v}{V} N \right)}{\partial \xi}, \quad (70)$$

onde

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V} \right)^2}}. \quad (71)$$

O princípio de relatividade requer agora que as equações de Maxwell-Hertz para o espaço vazio sejam válidas também no sistema k , se elas são válidas no sistema K , isto é, que para os vetores da força elétrica e da força magnética $((X', Y', Z')$ e (L', M', N')) do sistema em movimento k , definidos aqui pelos efeitos ponderomotores sobre massas elétricas e magnéticas,⁶ sejam válidas as equações:

$$\frac{1}{V} \frac{\partial X'}{\partial \tau} = \frac{\partial N'}{\partial \eta} - \frac{\partial M'}{\partial \zeta}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial L'}{\partial \tau} = \frac{\partial Y'}{\partial \zeta} - \frac{\partial Z'}{\partial \eta}, \quad (72)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial Y'}{\partial \tau} = \frac{\partial L'}{\partial \zeta} - \frac{\partial N'}{\partial \xi}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial M'}{\partial \tau} = \frac{\partial Z'}{\partial \xi} - \frac{\partial X'}{\partial \zeta}, \quad (73)$$

$$\frac{1}{V} \frac{\partial Z'}{\partial \tau} = \frac{\partial M'}{\partial \xi} - \frac{\partial L'}{\partial \eta}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial N'}{\partial \tau} = \frac{\partial X'}{\partial \eta} - \frac{\partial Y'}{\partial \xi}, \quad (74)$$

Agora, evidentemente os dois sistemas de equações encontrados para o sistema k devem expressar exatamente a mesma física, pois ambos são equivalentes às equações de Maxwell-Hertz para o sistema K . Além disso, como as equações de ambos os sistemas coincidem, a parte os símbolos que representam os vetores, segue então que as funções que aparecem nos sistemas de equações nos lugares correspondentes devem coincidir a menos de um fator $\psi(v)$, comum para todas as funções de um dos dois sistemas de equações, independente de ξ, η, ζ e τ e eventualmente dependente de v . Valem então as relações:

$$X' = \psi(v)X, \quad L' = \psi(v)L, \quad (75)$$

$$Y' = \psi(v)\beta \left(Y - \frac{v}{V} N \right), \quad M' = \psi(v)\beta \left(M + \frac{v}{V} Z \right), \quad (76)$$

$$Z' = \psi(v)\beta \left(Z + \frac{v}{V} M \right), \quad N' = \psi(v)\beta \left(N - \frac{v}{V} Y \right). \quad (77)$$

Construindo agora a inversão deste sistema de equações, primeiramente resolvendo as equações encontradas, secundariamente através a aplicação das equações na transformação inversa (de k para K),

⁶[N.d.T.] Uma força ponderomotriz é uma força não-linear produzida por um campo eletromagnético não-homogêneo oscilante.

que é caracterizada pela velocidade $-v$, segue então, considerando que ambos os sistemas de equações obtidos devem ser idênticos:⁷

$$\varphi(v) \cdot \varphi(-v) = 1 . \quad [\psi(v) \cdot \psi(-v) = 1 .] \quad (78)$$

Além disso, segue por razões de simetria, que⁸

$$\varphi(v) = \varphi(-v) ; \quad [\psi(v) = \psi(-v) ;] \quad (79)$$

e então temos

$$\varphi(v) = 1 , \quad [\psi(v) = 1 ,] \quad (80)$$

e as nossas equações adquirem a forma:

$$X' = X , \quad L' = L , \quad (81)$$

$$Y' = \beta \left(Y - \frac{v}{V} N \right) , \quad M' = \beta \left(M + \frac{v}{V} Z \right) , \quad (82)$$

$$Z' = \beta \left(Z + \frac{v}{V} M \right) , \quad N' = \beta \left(N - \frac{v}{V} Y \right) . \quad (83)$$

Para a interpretação destas equações consideramos o seguinte. Seja dada uma carga elétrica⁹ puntiforme que, medida no sistema de repouso K , seja de grandeza “um”, ou seja, estando em repouso no sistema de repouso exerce a força de 1 dina numa carga elétrica idêntica numa distância de 1 cm. Segundo o princípio de relatividade esta carga elétrica é também de grandeza “um” quando medida pelo sistema em movimento. Estando essa carga elétrica em repouso relativamente ao sistema de repouso, o vetor (X, Y, Z) é então por definição igual à força agindo sobre ela. Se a carga elétrica está em repouso com relação ao sistema em movimento (pelo menos no instante considerado), assim a força agindo nela e medida no sistema em movimento é igual ao vetor (X', Y', Z') . As primeiras três das equações acima podem ser expressadas em palavras das seguintes duas formas:

1. Estando um monopolo elétrico puntiforme em movimento num campo eletromagnético, age sobre ele, além da força elétrica, uma “força eletromotriz” que, negligenciando os termos multiplicados por potências de v/V de ordem dois e superiores, é igual ao produto vetorial da velocidade de movimento do monopolo e da força magnética, dividido pela velocidade da luz. (Formulação antiga.)

2. Estando um monopolo elétrico puntiforme em movimento num campo eletromagnético, a força agindo sobre ele é então igual à força elétrica existente no lugar do monopolo elétrico, que se obtém através a transformação do campo para um sistema de coordenadas em repouso relativamente ao monopolo elétrico. (Formulação nova.)

Algo análogo vale para as “forças magnetomotrizes”. Se vê que na teoria desenvolvida a força eletromotriz desempenha somente o papel de um conceito auxiliar, cuja introdução deve-se ao fato que as forças elétrica e magnética não possuem uma existência independente do estado de movimento do sistema de coordenadas.

Além disso, é claro que a assimetria mencionada na introdução, sobre a observação de correntes geradas pelo movimento relativo de um ímã e de um condutor, desaparece. Também questões sobre o “sítio” das forças eletromotrizes eletromagnéticas (máquinas unipolares) se tornam sem fundamento.

§ 7. Teoria do princípio de Doppler e da aberração.

No sistema K se encontra, muito longe da origem das coordenadas, uma fonte de ondas eletromagnéticas que, na parte de espaço que contém a origem das coordenadas, é representada com suficiente

⁷[N.d.T.] No texto original, na três equações que seguem, é usada a letra grega φ , mas este é um erro de digitação pois deveria ser usado ψ , como colocado entre colchetes.

⁸Sendo por exemplo $X = Y = Z = L = M = 0$ e $N \neq 0$, é claro então, por razões de simetria, que trocando o sinal de v sem mudança do valor numérico, Y' também tem que mudar o seu sinal sem mudar o seu valor numérico.

⁹[N.d.T.] A palavra alemã utilizada aqui por Einstein é *Elektrizitätsmenge*, que literalmente se traduz como “quantidade de eletricidade”. Eu preferi usar o termo “carga elétrica”.

aproximação pelas equações:

$$X = X_0 \sin \Phi, \quad L = L_0 \sin \Phi, \quad (84)$$

$$Y = Y_0 \sin \Phi, \quad M = M_0 \sin \Phi, \quad \Phi = \omega \left(t - \frac{ax + by + cz}{V} \right). \quad (85)$$

$$Z = Z_0 \sin \Phi, \quad N = N_0 \sin \Phi, \quad (86)$$

Aqui (X_0, Y_0, Z_0) e (L_0, M_0, N_0) são os vetores que determinam as amplitudes dos frentes de onda, a, b, c são os cossenos diretores das normais das ondas.

Investigamos sobre a natureza destas ondas quando as mesmas são estudadas por um observador em repouso no sistema em movimento k . - Através o uso das equações de transformação para as forças elétrica e magnética, encontradas no § 6, e as equações de transformação para as coordenadas e o tempo, encontradas no § 3, obtemos imediatamente:

$$X' = X_0 \sin \Phi', \quad L' = L_0 \sin \Phi', \quad (87)$$

$$Y' = \beta \left(Y_0 - \frac{v}{V} N_0 \right) \sin \Phi', \quad M' = \beta \left(M_0 + \frac{v}{V} Z_0 \right) \sin \Phi', \quad (88)$$

$$Z' = \beta \left(Z_0 + \frac{v}{V} M_0 \right) \sin \Phi', \quad N' = \beta \left(N_0 - \frac{v}{V} Y_0 \right) \sin \Phi', \quad (89)$$

$$\Phi' = \omega' \left(\tau - \frac{a'\xi + b'\eta + c'\zeta}{V} \right), \quad (90)$$

onde define-se

$$\omega' = \omega \beta \left(1 - a \frac{v}{V} \right), \quad (91)$$

$$a' = \frac{a - \frac{v}{V}}{1 - \frac{v}{V}}, \quad (92)$$

$$b' = \frac{b}{\beta \left(1 - a \frac{v}{V} \right)}, \quad (93)$$

$$c' = \frac{c}{\beta \left(1 - a \frac{v}{V} \right)}. \quad (94)$$

Da equação para ω' segue: estando um observador em movimento com velocidade v relativamente a uma fonte de luz infinitamente distante de frequência ν , de forma tal que a linha de ligação “fonte de luz-observador” forme o ângulo φ com a velocidade do observador referida ao sistema de coordenadas em repouso com respeito à fonte de luz, assim a frequência ν' da luz detectada pelo observador é dada pela equação:

$$\nu' = \nu \frac{1 - \cos \varphi \frac{v}{V}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V} \right)^2}}. \quad (95)$$

Este é o princípio de Doppler para velocidades arbitrárias. Para $\varphi = 0$ a equação adquire a forma bem clara:

$$\nu' = \nu \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V}}}. \quad (96)$$

Se vê que - contrariamente ao entendimento comum - para $v = -\infty$ tem-se $\nu = \infty$.

Chamando φ' o ângulo entre a normal de onda (a direção do raio) no sistema em movimento e a linha de ligação “fonte de luz-observador”, a equação para a' adquire a forma:

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - \frac{v}{V}}{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}. \quad (97)$$

Esta equação expressa a lei de aberração na sua forma mais geral. Sendo $\varphi = \pi/2$, a equação adquire a forma simples:

$$\cos \varphi' = -\frac{v}{V}. \quad (98)$$

Temos agora ainda que procurar a amplitude da onda, como a mesma aparece no sistema em movimento. Chamando A e A' a amplitude da força elétrica ou magnética, medida no sistema de repouso e no em movimento, respectivamente, obtém-se:

$$A'^2 = A^2 \frac{\left(1 - \frac{v}{V} \cos \varphi\right)^2}{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}, \quad (99)$$

a qual equação, para $\varphi = 0$, se torna a mais simples:

$$A'^2 = A^2 \frac{1 - \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V}}. \quad (100)$$

Segue das equações desenvolvidas que, para um observador que se aproxima com a velocidade V a uma fonte de luz, esta fonte de luz deve aparecer infinitamente intensa.

§ 8. Transformação da energia dos raios de luz. Teoria da pressão de radiação exercida em espelhos perfeitos.

Como a energia da luz por unidade de volume é igual a $A^2/8\pi$, então temos que considerar, pelo princípio de relatividade, $A'^2/8\pi$ como a energia da luz no sistema em movimento. Então seria A'^2/A^2 a razão da energia de um certo complexo de luz¹⁰ “medida em movimento” com a “medida em repouso”, se o volume de um complexo de luz medido em K e o volume medido em k fossem iguais. Isto, porém, não é o caso. Sendo a, b, c os cossenos diretores da normal de onda da luz no sistema de repouso, então nenhuma energia passa através os elementos de área da superfície esférica

$$(x - Vat)^2 + (y - Vbt)^2 + (z - Vct)^2 = R^2 \quad (101)$$

que se movimenta com a velocidade da luz; podemos então dizer que esta superfície contém permanentemente o mesmo complexo de luz. Investigamos a quantidade de energia que esta superfície contém no sistema k , ou seja, sobre a energia do complexo de luz relativa ao sistema k .

A superfície esférica é - observada no sistema em movimento - uma superfície elipsoidal, descrita, ao tempo $\tau = 0$, pela equação:

$$\left(\beta\xi - a\beta\frac{v}{V}\xi\right)^2 + \left(\eta - b\beta\frac{v}{V}\xi\right)^2 + \left(\zeta - c\beta\frac{v}{V}\xi\right)^2 = R^2. \quad (102)$$

Chamando S o volume da esfera, e S' o do elipsoide, tem-se então, como um simples cálculo mostra:

$$\frac{S'}{S} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}. \quad (103)$$

¹⁰[N.d.T.] Em alemão *Lichtkomplex*. Pode ser entendido como um trem de ondas planas contido num dado volume.

Chamando então E a energia medida no sistema de repouso e E' a medida no sistema em movimento, que é contida pela esfera considerada, obtém-se:

$$\frac{E'}{E} = \frac{\frac{A'^2}{8\pi} S'}{\frac{A^2}{8\pi} S} = \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}, \quad (104)$$

a qual fórmula se escreve, para $\varphi = 0$, mais simplesmente:

$$\frac{E'}{E} = \frac{\sqrt{1 - \frac{v}{V}}}{\sqrt{1 + \frac{v}{V}}}. \quad (105)$$

É notável que a energia e a frequência de um complexo de luz mudem com relação ao estado de movimento do observador de acordo com as mesmas leis.

Seja agora o plano de coordenadas $\xi = 0$ uma superfície perfeitamente refletora na qual as ondas planas consideradas no último parágrafo são refletidas. Analisamos a pressão da luz exercida sobre a superfície refletora e sobre a direção, frequência e intensidade da luz após a reflexão.

Seja a luz incidente definida pelas quantidades A , $\cos \varphi$, ν (referidas ao sistema K). As quantidades correspondentes consideradas em k são:

$$A' = A \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}, \quad (106)$$

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - \frac{v}{V}}{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}, \quad (107)$$

$$\nu' = \nu \frac{1 - \frac{v}{V} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}}. \quad (108)$$

Para a luz refletida obtemos, se referimos o processo ao sistema k :

$$A'' = A', \quad (109)$$

$$\cos \varphi'' = -\cos \varphi', \quad (110)$$

$$\nu'' = \nu'. \quad (111)$$

Enfim, obtém-se para a luz refletida, transformando de volta ao sistema de repouso K :

$$A''' = A'' \frac{1 + \frac{v}{V} \cos \varphi''}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} = A \frac{1 - 2\frac{v}{V} \cos \varphi + \left(\frac{v}{V}\right)^2}{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}, \quad (112)$$

$$\cos \varphi''' = \frac{\cos \varphi'' + \frac{v}{V}}{1 + \frac{v}{V} \cos \varphi''} = -\frac{\left(1 + \left(\frac{v}{V}\right)^2\right) \cos \varphi - 2\frac{v}{V}}{1 - 2\frac{v}{V} \cos \varphi + \left(\frac{v}{V}\right)^2}, \quad (113)$$

$$\nu''' = \nu'' \frac{1 + \frac{v}{V} \cos \varphi''}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} = \nu \frac{1 - 2\frac{v}{V} \cos \varphi + \left(\frac{v}{V}\right)^2}{\left(1 - \frac{v}{V}\right)^2}. \quad (114)$$

A energia (medida no sistema de repouso) que incide por unidade tempo na superfície do espelho é evidentemente $A^2/8\pi(V \cos \varphi - v)$. A energia que se afasta da superfície do espelho na unidade de tempo é $A'^2/8\pi(-V \cos \varphi' + v)$. A diferença destas duas expressões é, segundo o princípio da energia, o trabalho executado por unidade de tempo pela pressão da luz. Igualando este trabalho ao produto $P \cdot v$, onde P é a pressão da luz, obtém-se:

$$P = 2 \frac{A^2}{8\pi} \frac{\left(\cos \varphi - \frac{v}{V}\right)^2}{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}. \quad (115)$$

Em primeira aproximação obtém-se, em conformidade com a experiência e com outras teorias

$$P = 2 \frac{A^2}{8\pi} \cos^2 \varphi. \quad (116)$$

Todos os problemas da ótica dos corpos em movimento podem ser resolvidos de acordo com o método usado aqui. O essencial é que a força elétrica e a magnética da luz, que é afetada por um corpo em movimento, sejam transformadas para um sistema de coordenadas em repouso relativamente ao corpo. Por meio disso, cada problema da ótica dos corpos em movimento é reconduzido a uma sequência de problemas da ótica dos corpos em repouso.

§ 9. Transformação das equações de Maxwell-Hertz considerando as correntes de convecção.

Começamos das equações:

$$\frac{1}{V} \left\{ u_x \varrho + \frac{\partial X}{\partial t} \right\} = \frac{\partial N}{\partial y} - \frac{\partial M}{\partial z}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial y}, \quad (117)$$

$$\frac{1}{V} \left\{ u_y \varrho + \frac{\partial Y}{\partial t} \right\} = \frac{\partial L}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial z}, \quad (118)$$

$$\frac{1}{V} \left\{ u_z \varrho + \frac{\partial Z}{\partial t} \right\} = \frac{\partial M}{\partial x} - \frac{\partial L}{\partial y}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial x}, \quad (119)$$

onde

$$\varrho = \frac{\partial X}{\partial x} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} \quad (120)$$

representa a densidade, multiplicada por 4π , da eletricidade e (u_x, u_y, u_z) o vetor velocidade da eletricidade. Imaginando as massas elétricas ligadas invariavelmente a corpos rígidos e pequenos (íons, elétrons), estas equações são a base eletromagnética da eletrodinâmica de Lorentz e da ótica dos corpos em movimento.

Transformando estas equações, que são válidas no sistema K , para o sistema k , com a ajuda das equações de transformação do § 3 e do § 6, obtém-se as equações:

$$\frac{1}{V} \left\{ u_\xi \varrho' + \frac{\partial X'}{\partial \tau} \right\} = \frac{\partial N'}{\partial \eta} - \frac{\partial M'}{\partial \zeta}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial L'}{\partial \tau} = \frac{\partial Y'}{\partial \zeta} - \frac{\partial Z'}{\partial \eta}, \quad (121)$$

$$\frac{1}{V} \left\{ u_\eta \varrho' + \frac{\partial Y'}{\partial \tau} \right\} = \frac{\partial L'}{\partial \zeta} - \frac{\partial N'}{\partial \xi}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial M'}{\partial \tau} = \frac{\partial Z'}{\partial \xi} - \frac{\partial X'}{\partial \zeta}, \quad (122)$$

$$\frac{1}{V} \left\{ u_\zeta \varrho' + \frac{\partial Z'}{\partial \tau} \right\} = \frac{\partial M'}{\partial \xi} - \frac{\partial L'}{\partial \eta}, \quad \frac{1}{V} \frac{\partial N'}{\partial \tau} = \frac{\partial X'}{\partial \eta} - \frac{\partial Y'}{\partial \xi}, \quad (123)$$

onde

$$\frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{V^2}} = u_\xi, \quad (124)$$

$$\frac{u_y}{\beta \left(1 - \frac{u_x v}{V^2}\right)} = u_\eta, \quad \varrho' = \frac{\partial X'}{\partial \xi} + \frac{\partial Y'}{\partial \eta} + \frac{\partial Z'}{\partial \zeta} = \beta \left(1 - \frac{u_x v}{V^2}\right) \varrho. \quad (125)$$

$$\frac{u_z}{\beta \left(1 - \frac{u_x v}{V^2}\right)} = u_\zeta. \quad (126)$$

Sendo - como segue do teorema de adição das velocidade (§ 5) - o vetor (u_ξ, u_η, u_ζ) a velocidade das massas elétricas, medida no sistema k , mostra-se com isso que, com base nos nossos princípios cinemáticos, o fundamento eletrodinâmico da teoria de Lorentz da eletrodinâmica dos corpos em movimento corresponde ao princípio de relatividade.

Seja ainda rapidamente notado que das equações desenvolvidas pode ser facilmente deduzida a seguinte importante afirmação: se um corpo eletricamente carregado movimenta-se livremente no espaço e ao mesmo tempo a sua carga, observada de um sistema de coordenadas em movimento com o corpo, não varia, ela também permanece constante de acordo com o sistema K “de repouso”.

§ 10. Dinâmica do elétron (lentamente acelerado).

Num campo eletromagnético movimenta-se uma partícula puntiforme, dotada de uma carga elétrica ε (daqui para frente chamada “elétron”), sobre cuja lei de movimento supomos somente o seguinte:

Estando o elétron em repouso numa dada época, então o seu movimento no seguinte intervalo de tempo ocorre segundo as equações:

$$\mu \frac{d^2 x}{dt^2} = \varepsilon X, \quad (127)$$

$$\mu \frac{d^2 y}{dt^2} = \varepsilon Y, \quad (128)$$

$$\mu \frac{d^2 z}{dt^2} = \varepsilon Z, \quad (129)$$

desde que o elétron se movimenta lentamente. Aqui x, y, z representam as coordenadas do elétron, μ a massa do elétron.

Secundariamente, o elétron possui a velocidade v num dado instante de tempo. Procuramos a lei segundo a qual o elétron se movimenta no instante de tempo imediatamente seguinte.

Sem influenciar a generalidade do argumento, podemos e queremos supor que o elétron, no momento em que o observamos, se encontre na origem das coordenadas e que se movimenta ao longo do eixo X do sistema K com velocidade v . É então óbvio que o elétron esteja em repouso no mencionado instante ($t = 0$) relativamente a um sistema de coordenadas k em movimento paralelo com velocidade constante v ao longo do eixo X .

Dos pressupostos feitos a cima é claro, em relação ao princípio de relatividade, que o elétron observado do sistema k se movimenta no tempo imediatamente seguinte (para pequenos valores de t) segundo as equações:

$$\mu \frac{d^2 \xi}{d\tau^2} = \varepsilon X', \quad (130)$$

$$\mu \frac{d^2 \eta}{d\tau^2} = \varepsilon Y', \quad (131)$$

$$\mu \frac{d^2 \zeta}{d\tau^2} = \varepsilon Z', \quad (132)$$

Onde os símbolos $\xi, \eta, \zeta, \tau, X', Y', Z'$ referem-se ao sistema k . Estabelecendo ainda que, para $t = x = y = z = 0$ deva ser $\tau = \xi = \eta = \zeta = 0$, assim que as equações de transformação do §§ 3 e 6 sejam válidas, tem-se então:

$$\tau = \beta \left(t - \frac{v}{V^2} x \right), \tag{133}$$

$$\xi = \beta(x - vt), \quad X' = X, \tag{134}$$

$$\eta = y, \quad Y' = \beta \left(Y - \frac{v}{V} N \right), \tag{135}$$

$$\zeta = z, \quad Z' = \beta \left(Z + \frac{v}{V} M \right). \tag{136}$$

Com a ajuda destas equações transformamos as equações do movimento a cima, do sistema k para o sistema K , e obtemos:

$$(A) \quad \begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{\varepsilon}{\mu} \frac{1}{\beta^3} X, \\ \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{\varepsilon}{\mu} \frac{1}{\beta} \left(Y - \frac{v}{V} N \right), \\ \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{\varepsilon}{\mu} \frac{1}{\beta} \left(Z + \frac{v}{V} M \right). \end{cases} \tag{137}$$

Investigamos agora, segundo a abordagem usual, a massa “longitudinal” e a “transversal” do elétron em movimento. Escrevemos as equações (A) na forma

$$\mu\beta^3 \frac{d^2x}{dt^2} = \varepsilon X = \varepsilon X', \tag{138}$$

$$\mu\beta^2 \frac{d^2y}{dt^2} = \varepsilon\beta \left(Y - \frac{v}{V} N \right) = \varepsilon Y', \tag{139}$$

$$\mu\beta^2 \frac{d^2z}{dt^2} = \varepsilon\beta \left(Z + \frac{v}{V} M \right) = \varepsilon Z', \tag{140}$$

e reparamos primeiramente que $\varepsilon X', \varepsilon Y', \varepsilon Z'$ são as componentes da força ponderomotriz que age sobre o elétron, e observada num sistema em movimento que, no instante considerado, possui justamente a mesma velocidade do elétron. (Esta força poderia ser medida nesse sistema, por exemplo, com uma balança a mola.) Se agora chamamos esta força simplesmente “a força agindo no elétron” e mantemos a equação

$$\text{Valor da massa} \times \text{valor da aceleração} = \text{valor da força}, \tag{141}$$

e se, além disso, estabelecemos que as acelerações devem ser medidas no sistema de repouso K , obtemos das equações a cima:

$$\text{Massa longitudinal} = \frac{\mu}{\left(\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V} \right)^2} \right)^3}, \tag{142}$$

$$\text{Massa transversal} = \frac{\mu}{1 - \left(\frac{v}{V} \right)^2}. \tag{143}$$

Naturalmente obteriam-se outros valores para as massas usando outra definição da força e da aceleração; disto se aprende que deve-se proceder com muito cuidado na comparação de diferentes teorias do movimento do elétron.

Ressaltamos que estes resultados sobre as massas são válidos também para os pontos materiais ponderáveis; pois um ponto material ponderável pode ser tornado, através a introdução de uma carga elétrica arbitrariamente pequena, um elétron (no nosso sentido).

Determinamos a energia cinética do elétron. Movimentando-se um elétron da origem das coordenadas do sistema K ao longo do eixo X com a velocidade inicial 0 e constantemente sujeito ao efeito de uma força eletrostática X , é claro então que a energia subtraída ao campo eletrostático tem o valor $\int \varepsilon X dx$. Como o elétron deve ser lentamente acelerado, e por causa disso não pode emitir nenhuma energia sob forma de radiação, então a energia subtraída ao campo eletrostático deve ser igualada à energia de movimento W do elétron. Disto obtém-se, considerando que durante todo o processo de movimento observado vale a primeira das equações (A):

$$W = \int \varepsilon X dx = \int_0^v \beta^3 v dv = \mu V^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}. \quad (144)$$

W se torna então, para $v = V$, infinitamente grande. Velocidades super-luminais não possuem - como nos nossos resultados anteriores - uma possibilidade de existência.

Também esta expressão para a energia cinética deve, segundo o argumento fornecido a cima, valer também para massas ponderáveis.

Queremos agora enumerar as propriedades do movimento do elétron que resultam do sistema de equações (A) e que são acessíveis ao experimento:

1. Da segunda equação do sistema (A) segue que uma força elétrica Y e uma força magnética N possuem então um efeito deflexionador igualmente forte para um elétron em movimento com a velocidade v , se $Y = N \cdot v/V$. Se deduz então que a determinação da velocidade do elétron é possível, conforme nossa teoria, a partir da razão entre as deflexões magnética A_m e elétrica A_e , para velocidades arbitrárias, através o uso da lei:

$$\frac{A_m}{A_e} = \frac{v}{V}. \quad (145)$$

Esta relação pode ser provada experimentalmente, pois a velocidade do elétron pode ser medida diretamente, por exemplo por meio de campos elétricos e campos magnéticos rapidamente oscilantes.

2. Da derivação para a energia cinética do elétron segue que deve valer a seguinte relação entre a diferença de potencial atravessada e a velocidade v alcançada pelo elétron:

$$P = \int X dx = \frac{\mu}{\varepsilon} V^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}. \quad (146)$$

3. Calculamos o raio de curvatura da trajetória, R , no caso seja dada uma força magnética N (como única força defletora) agindo perpendicularmente à velocidade do elétron. Da segunda das equações (A) obtemos:

$$-\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{v^2}{R} = \frac{\varepsilon}{\mu} \frac{v}{V} N \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2} \quad (147)$$

ou

$$R = V^2 \frac{\mu}{\varepsilon} \cdot \frac{\frac{v}{V}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \cdot \frac{1}{N}. \quad (148)$$

Estas três relações são uma expressão completa para as leis segundo as quais o elétron tem que se movimentar, de acordo com a teoria apresentada.

Para concluir, destaco que no trabalho dos problemas aqui tratados o meu amigo e colega M. Besso esteve fielmente ao meu lado e que estou em dívida com ele por várias importantes sugestões.

Berna, Junho 1905.

(Recebido em 30 de junho de 1905)

Antônio Brasil Batista (09/10/1938 – 01/03/2020)



Figura 1: Professor Antônio Brasil Batista.

No dia 01 de março de 2020 faleceu Antônio Brasil Batista, professor emérito do Departamento de Física da UFES, e criador do Grupo de Pesquisa em Cosmologia e Gravitação da UFES, que se transformaria posteriormente no Núcleo Cosmo-ufes.

Prof. Brasil nasceu em 09 de outubro de 1938 em Ponta Grossa, Paraná. Depois de estudos de graduação na Universidade Federal do Paraná, realizou doutorado no Institut Henri Poincaré, França, sob a orientação de Marie Antoniette Tonnelat. Foi contratado pela UFES em 1973, atuando primeiramente no Departamento de Matemática transferindo-se depois para o Departamento de Física. Foi o iniciador na UFES, junto com o prof. José Plínio Baptista, também falecido, das atividades de pesquisa em Cosmologia e Gravitação, formando um dos primeiros grupos de pesquisa nestas áreas no país, e que se tornaria referência no cenário científico brasileiro. Contribuiu para a criação do Programa de Pós-Graduação em Física (PPGFis) da UFES, nos anos 90, e mais recentemente para a criação do Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação (PPGCosmo), da mesma instituição.

Aposentado desde 1996, continuou ativo até seu falecimento, tanto nas atividades de Ensino como de Pesquisa. Lecionava regularmente a disciplina de Teoria Eletromagnética na Pós-Graduação. Deveria novamente ministrar esta disciplina no primeiro semestre de 2020. Continuava ativo em pesquisa tendo sido, aos 81 anos de idade, coautor de artigo sobre Cosmologia Quântica em Teorias Modificadas da Gravitação, postado no Arxiv em janeiro de 2020 e publicado na revista Universe [Universe **6**, 50(2020)]. Frequentava a UFES diariamente, mesmo no período de recesso acadêmico.

Dotado de uma vasta cultura, não apenas em Física e Matemática, mas também em Ciências

em geral, em Música (mantinha programa de semanal de música clássica na Rádio Universitária da UFES), História, Literatura e Artes, era uma referência para todos os que o conheceram pela sua conduta profissional e pessoal, sua imensa sensibilidade e inteligência.

Foi uma imensa perda para todos os que o conheceram e puderam usufruir do seu convívio. O país perdeu um dos seus pesquisadores pioneiros.

Júlio C. Fabris (UFES)

A Mostra de Astronomia do Espírito Santo - MAES

Desde o ano de 2018, o Programa de Pós-Graduação em Astrofísica, Cosmologia e Gravitação (PPGCosmo), em parceria com o Núcleo Cosmo-ufes e o Instituto Federal do Espírito Santo (IFES), tem organizado a Mostra de Astronomia do Espírito Santo (MAES). Buscando a popularização da prática científica no meio estudantil, a MAES proporciona um ambiente de debate e troca de ideias entre alunos, professores e pesquisadores, na perspectiva de somar esforços ao processo de formação de jovens pesquisadores no estado do Espírito Santo. Renomados pesquisadores atuando na área de astronomia e física contribuem na avaliação dos trabalhos inscritos, além de ministrarem seminários e mini-cursos para os participantes. A realização da MAES tem contado com apoio do CNPq, FAPES, UFES e IFES e, entre os trabalhos com melhor classificação, são distribuídas bolsas de Iniciação Científica Jr. Para obter maiores informações sobre a MAES 2020 basta acessar o site www.cosmo-ufes.org/maes2020.

Aproveitando o lançamento dos CADERNOS DE ASTRONOMIA, gostaríamos de mais uma vez parabenizar todos os participantes das duas edições da MAES. Este número, conta com o artigo da equipe vencedora da MAES 2019, “Astrologia e astronomia: os paralelos entre a crença e a ciência”, mas gostaríamos de expor também, os demais premiados das edições passadas da MAES. São eles:

- Trabalhos ganhadores da MAES 2018.

1. *Relatividade restrita e geral.*

IFES-Vitória. Orientado pelo Prof. César Turczyn.

2. *Impactos da poluição luminosa: o céu que a gente não vê.*

IFES-Cariaciaca. Orientado pelo Prof. Robson Leone Evangelista.

3. *Equação de Drake: perspectivas para a astrobiologia.*

IFES-Cariaciaca. Orientado pelo Prof. Robson Leone Evangelista.

4. *Expansão do universo e energia escura.*

IFES-Vitória. Orientado pela Prof.^a Aline Costalonga Gama

5. *Modelagem computacional de movimentos orbitais para o problema de três corpos.*

IFES-Cariaciaca. Orientado pelo Prof. Wesley Spalenza.

6. *Caçando asteroides e aprendendo astronomia.*¹

EEEM Dr. Silva Mello, Guarapari. Orientado pela Prof.^a Lucia H. Horta Oliveira

¹Trabalho premiado por ser o mais bem colocado entre escolas da rede estadual de ensino, por recomendação da banca avaliadora.

- Trabalhos ganhadores da MAES 2019

(esta edição dividiu os trabalhos em grupos de acordo com a rede de ensino).

- **Melhor Trabalho da MAES 2019:**

Astrologia não é uma ciência.

IFES - Vitória. Orientado pela Prof.^a Aline Costalonga Gama.

- Ensino Fundamental:

Celebridades e descobertas astronômicas.

EMEF Prof.^a Herinea Lima Oliveira, São Mateus. Orientado pelo Prof. Alexandre Marcelino de Mello;

- Escola Particular:

TSI - Telescópio para Síndrome de Irlen.

Colégio Marista Champagnat Terra Vermelha, Vila Velha. Orientado pelo Prof. Kim Okada;

- Escolas Públicas Federais:

1. *Astrologia não é uma ciência.*

IFES - Vitória. Orientado pela Prof.^a Aline Costalonga Gama;

2. *Física e astronomia: como as áreas se entrelaçam na construção de um telescópio.*

IFES - Guarapari. Orientado pelo Prof. Paulo Arnaldo Fantin;

3. *A morte térmica do Universo.*

IFES - Vitória. Orientado pela Prof.^a Aline Costalonga Gama.

- Escolas Públicas Estaduais:

1. *Registro de meteoros na constelação de Hidra.*

EEEM Dr. Silva Mello - Guarapari. Orientado pela Prof.^a Lucia H. Horta Oliveira.

2. *Sistema solar magnético.*

EEEFM Santo Antonio, São Mateus. Orientado pelo Prof. Ezequiel Bonfim dos Santos.

3. *A grande contribuição do Brasil à teoria da relatividade geral.*

EEEFM Armando Barbosa Quitiba, Sooretama. Orientado pela Prof.^a Wanessa Santos Santana.

Adriano M. Oliveira

IFES-Guarapari

Júlio C. Fabris e Júnior D. Toniato

UFES