

O E C L I P S E D E S O B R A L

ORGANIZAÇÃO
ANELISE PACHECO
JOÃO DOS ANJOS

“A QUESTÃO QUE MINHA MENTE FORMULOU FOI RESPONDIDA PELO RADIANTE CÉU DO BRASIL”

ALBERT EINSTEIN

A EFEMÉRIDE DE SOBRAL

No início do século XX, duas teorias entravam em conflito no mundo de Einstein: a física de Newton, que com sua Mecânica e sua Gravitação Universal, de 1687, descreviam os movimentos dos corpos, na Terra e no espaço; e o Eletromagnetismo de Maxwell, de 1862, que unificava os fenômenos do magnetismo e da eletricidade. Segundo essa teoria, não só a luz é uma onda eletromagnética, mas seria possível gerar outros tipos de ondas, como as de rádio, o que logo encontrou muitas aplicações práticas.

No entanto essas duas teorias de sucesso eram incompatíveis entre si! A solução que Einstein encontrou, em 1905, foi mudar a muito bem estabelecida mecânica, revolucionando nossos conceitos de espaço, tempo e energia. Restava ainda a velha gravitação de Newton, incompatível agora com a nova mecânica de Einstein. A solução foi mais uma revolução, introduzindo o conceito da gravidade como um efeito da curvatura do espaço-tempo. Nessa concepção, a luz deveria seguir uma trajetória curva perto de corpos massivos e Einstein logo percebeu que medir essa deflexão da luz seria um teste para sua nova teoria. Em particular, a luz de uma estrela ao passar perto do Sol teria sua trajetória curvada pelo

espaço distorcido por ele. Mas como ver estrelas perto do Sol para medir essa deflexão? Durante um eclipse propôs Einstein!

Em maio de 1919, o astrônomo inglês Arthur Eddington enviou astrônomos ingleses para a cidade de Sobral no Ceará e viajou para a Ilha do Príncipe para obter registros que demonstrariam este fenômeno. O que as equipes do Príncipe e de Sobral fizeram foi tirar fotos das estrelas que se viam próximas da borda do Sol durante o eclipse total e medir o desvio em relação a sua posição em fotos tiradas à noite, sem o sol no campo de visão.

Graças ao Observatório Nacional, que organizou a expedição a Sobral e montou a infraestrutura que garantiu o sucesso das observações, Eddington pôde comprovar, através das placas fotográficas de Sobral, as previsões da Teoria da Relatividade Geral de Einstein. A participação ativa do Observatório Nacional e a sua integração em um projeto internacional tão importante foi uma das primeiras demonstrações do protagonismo da ciência brasileira a nível mundial.

A teoria da Relatividade Geral previu muitas coisas que Einstein não idealizou. A descoberta, por exemplo, que as galáxias distantes estão se afastando de nós e que há um fundo de radiação permeando o espaço

forneceu evidência para a expansão do Universo. Hoje sabemos que essa expansão ocorre de forma acelerada, provavelmente devido à chamada energia escura, que comporia cerca de 70% Universo. Outros 25% seriam devidos a outra componente desconhecida, a matéria escura, sendo apenas 5% composto por tudo o que conhecemos, como os átomos.

É com grande orgulho que o MAST e o ON comemoram a efeméride do centenário do Eclipse de Sobral, ocorrido em 29 de maio de 2019, com esta publicação. Ela está dividida em três partes: a concepção do mundo antes da teoria da Relatividade Geral de Einstein, narrada pelo curador Luiz Alberto Oliveira; uma incursão pelas três expedições à Sobral relatada pelo colaborador do MAST, Oscar Matsuura; e as previsões da teoria que só foram descobertas recentemente, como as ondas gravitacionais, a matéria escura e a energia escura, descritas pelo astrofísico Martin Makler.

Convidamos o leitor(a) a juntar-se a nós na descrição dos acontecimentos que culminaram na existência desta tão importante efeméride.

Anelise Pacheco
João dos Anjos

LUIZ ALBERTO OLIVEIRA

OS ANTECESSORES

A EVOLUÇÃO
DA IDEIA DE
COSMOS DA
ANTIGUIDADE AO
SÉCULO 19

A observação de que a natureza é rica em regularidades – isto é, fenômenos rítmicos ou periódicos – foi um dos sinais inequívocos do desenvolvimento da inteligência no homem. E suas evidências arqueológicas remontam a dezenas de milhares de anos. Não admira que a imagem mais arcaica do tempo de que podemos dispor, segundo os historiadores das ideias, seja a do ciclo. Desde as eras mais remotas, inúmeros povos compartilharam a convicção de que a Natureza se organizaria ritmicamente, sendo a conjugação dos diversos ritmos naturais a própria expressão da ordem cósmica ou divina vigente. Por exemplo, nas mitologias de praticamente todas as culturas humanas encontramos a associação de eventos primordiais (relatos da Origem, episódios fundadores, feitos heroicos) com a disposição de constelações no céu. Tão generalizada parece ter sido a prática humana de codificar acontecimentos modelares por meio de uma simbologia celeste – ou estelar – que o filósofo da Ciência Giorgio de Santillana arrisca-se a afirmar, invertendo os termos da equação habitual, que a observação científica precederia a enunciação mítica, e resume esta opinião numa fórmula atrevidamente atraente: “O homem é o animal que olha para o céu”.

Mitologia Egípcia:
Nut, a Deusa do Céu
Noturno, enlaça Geb,
o Deus da Terra.
Fonte: <https://egyptholidaytravel.com/nut-sky-goddess-ancient-egyptian-religion/>
Crédito: Dea Picture Library/De Agostini



Não há controvérsias, todavia, acerca do papel verdadeiramente capital desempenhado na história do conhecimento científico pelo longo (e possivelmente árduo) processo de registro de correlações entre os ritmos que regulam os fenômenos naturais – biológicos, climáticos, sazonais – terrestres e a repetição de configurações dos astros. Neste sentido, a Astronomia seria indubitavelmente a primeira das ciências, e a elaboração de calendários – tabelas que exprimem associações entre ciclos da natureza e ciclos celestes – a primeira das “tecnologias”. Ao seu estabelecimento se deve o triunfo da revolução agrícola do Neolítico e a consequente aparição e prosperidade das grandes civilizações antigas, cujas mitologias e cosmogonias costumavam conceber o Tempo exatamente como a repetição cíclica dos acontecimentos.

Stonehenge, antigo observatório da Idade do Bronze britânica.

Fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stonehenge>

Crédito: *David Goddard/British Geographical/ Getty Images*



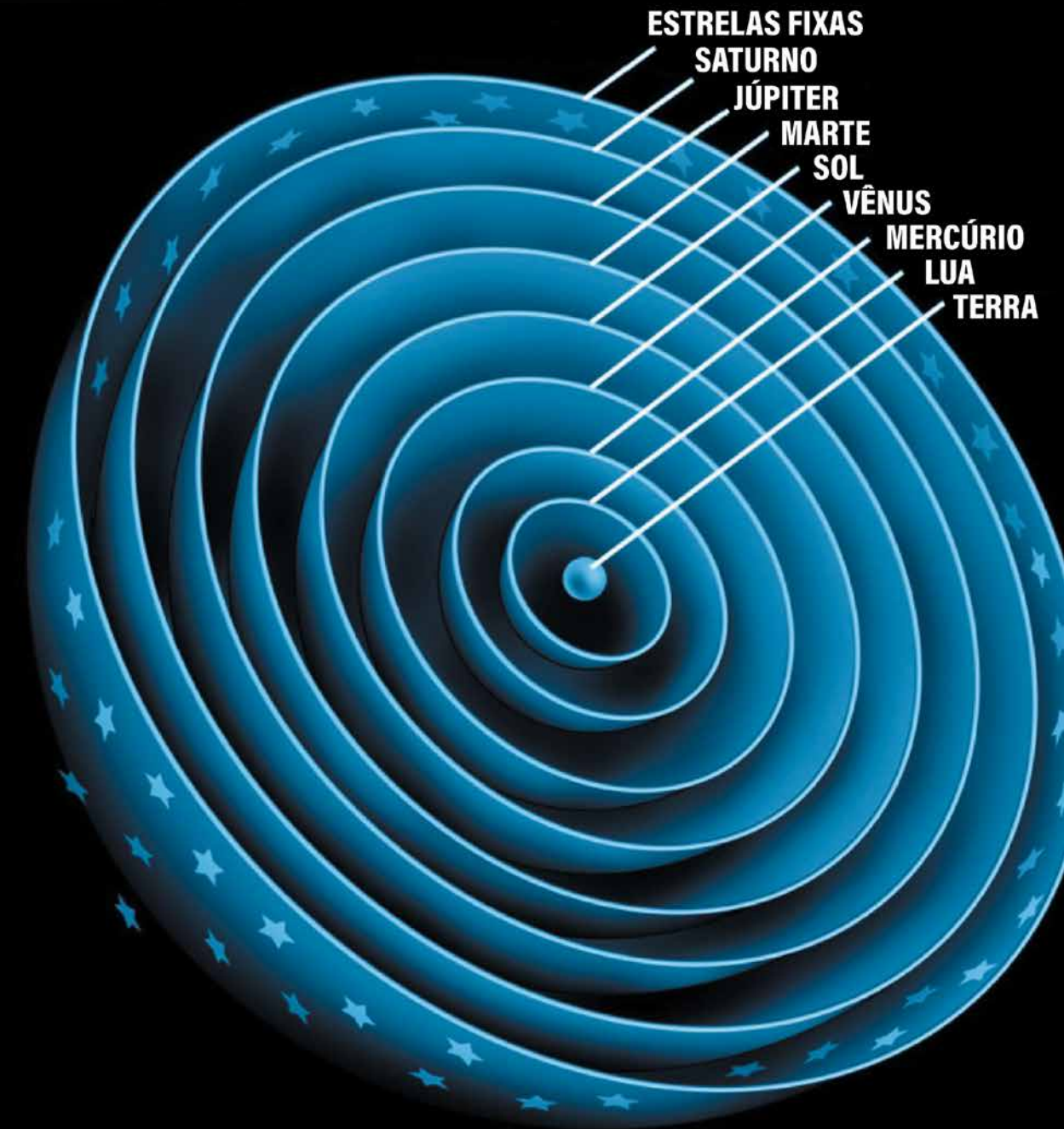
Se considerarmos a história das culturas, encontraremos uma variedade de formas para simbolizar a relação entre o Céu e a Terra. Os egípcios, por exemplo, figuravam o céu como uma mulher que enlaça seu enamorado, o mundo; os Navajos norte-americanos falavam da grande serpente do céu, cuja troca periódica de escamas correspondia ao ciclo das estações. Na Índia, na Babilônia... por toda parte encontramos alegorias como essas.

O surgimento do Universo, segundo os pintores reais do Rajastão, Índia. Fonte: *Garden & Cosmos: The Royal Paintings of Jodhpur* (Debra Diamond, British Museum/Smithsonian Institution Press, 2008). Crédito: *Cosmic Oceans (detail)*, from the *Nath Charit*, attributed to Bulaki, 1823; Mehrangarh Museum Trust



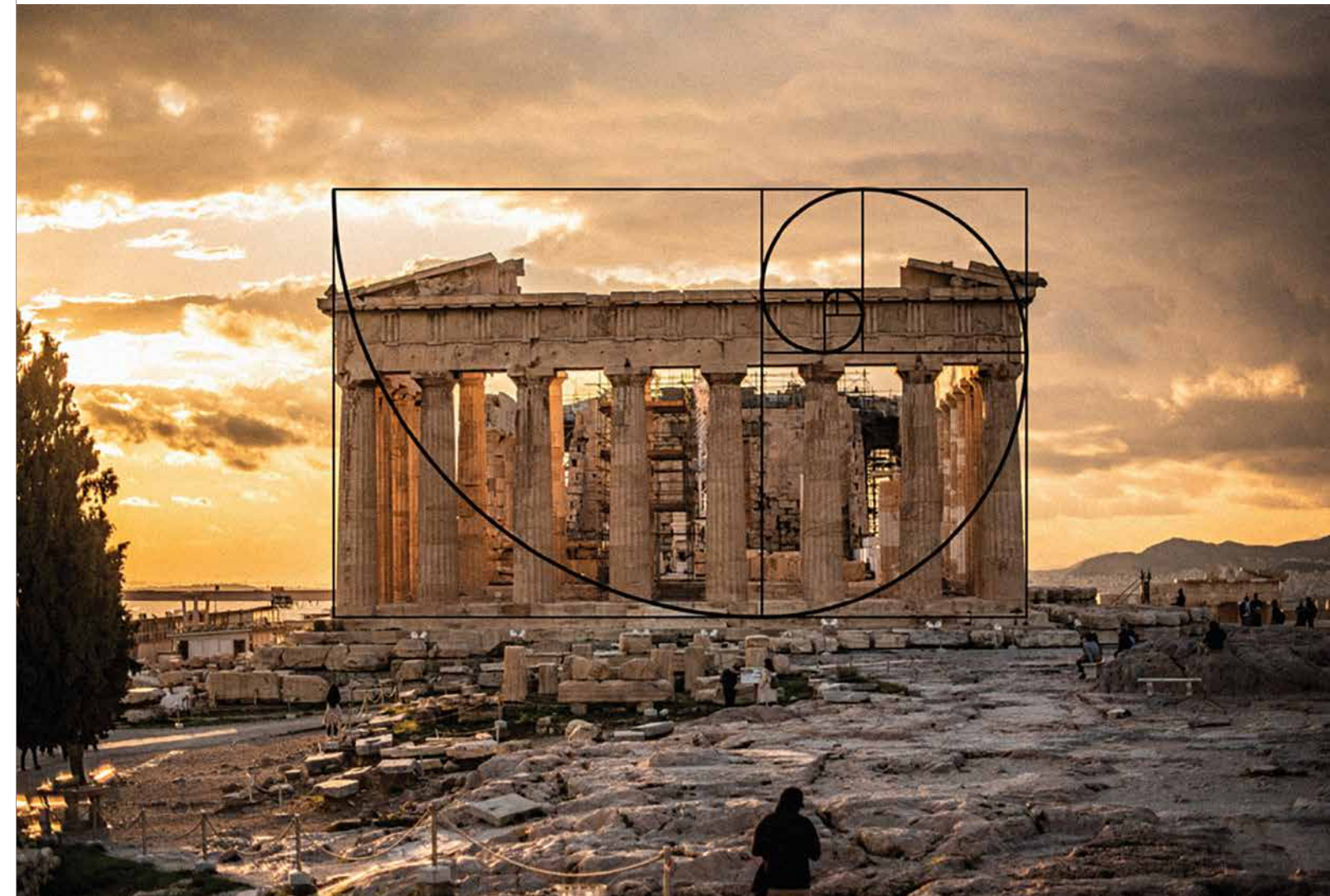
Surpreendente, porém, foi a concepção de caráter abstrato que os gregos da época clássica produziram. Sua contribuição original para a representação da Natureza foi lançar mão de imagens geométricas como metáforas para figurar os seres e os acontecimentos do mundo natural – e, em particular, para a descrição da relação entre o Céu e a Terra. Sob inspiração de pensadores audaciosos, como Tales de Mileto e Pitágoras de Samos, escolheram uma figura geométrica de máxima simetria, a esfera, como o símbolo de perfeição, ordem e equilíbrio que deveria imperar na Natureza. E afirmaram, assim, que o Todo se assemelharia a uma sequência de cascas esféricas concêntricas encaixadas umas nas outras.

A Esfera, a mais perfeita das figuras.
Fonte: <http://new-universe.org/zenphoto/Chapter1/Illustrations/Abrams9.jpg.php>
Crédito: *Nicolle Rager Fuller. [From VFTC, p. 134]*



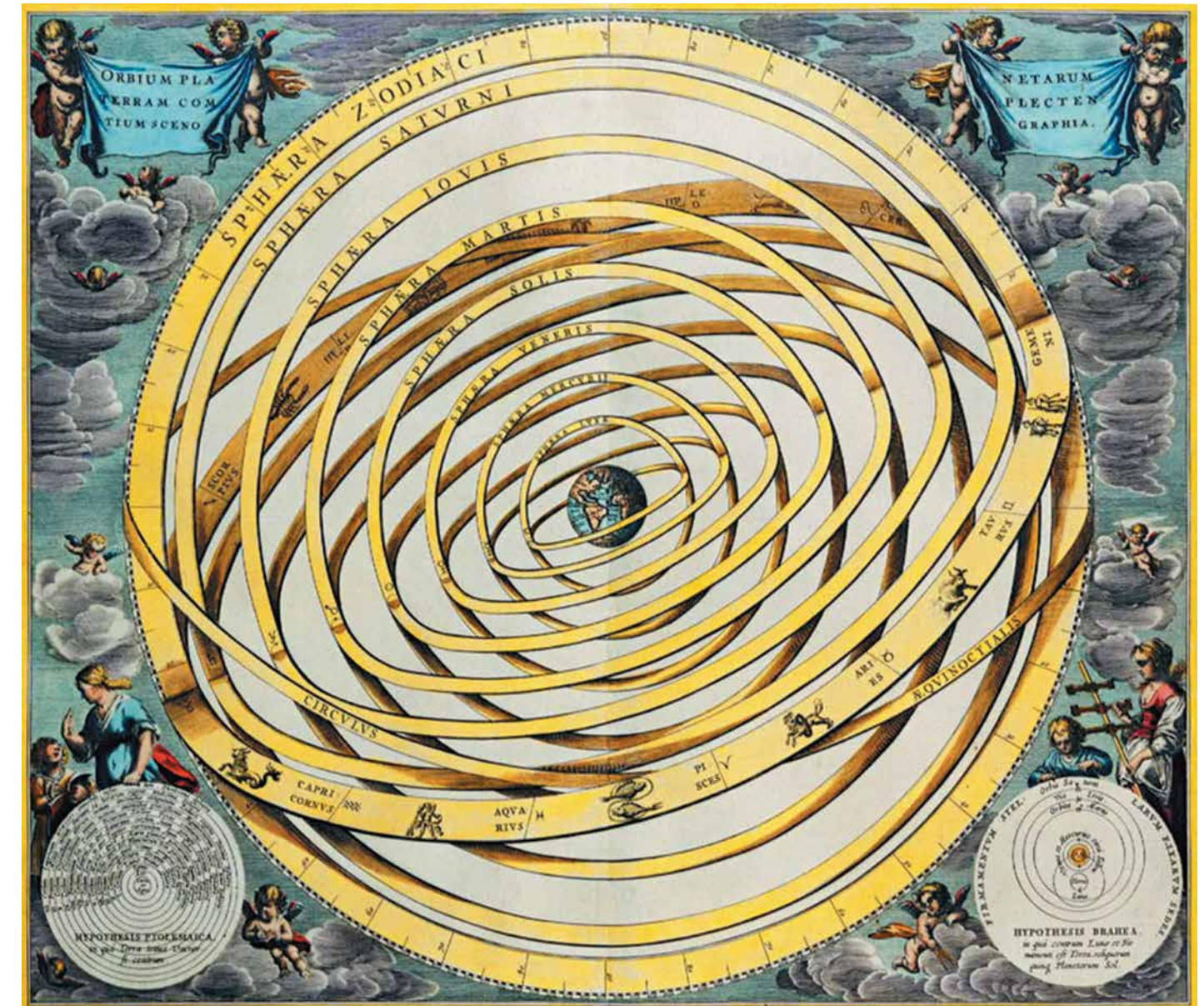
Esta imagem, de uma totalidade grandiosamente arredondada – que surge já em traços bem-acabados no “*Timeu*”, de Platão –, foi denominada de Cosmos, significando Todo-Ordenado ou Todo-Belo, pois para estes gregos as noções de simetria e ordem vinculavam-se à de beleza (em grego, *kosmé*, raiz também de cosmético). Totalidade essa em que cada parte tem o seu lugar definido em função de um princípio ideal de proporções harmoniosas. Não seria absurdo afirmar que a apreensão dessa harmonia constituiu o objetivo último da ciência grega. Esta foi uma concepção de mundo que não havia sido imaginada antes, e dominará a imaginação do Ocidente por quase 20 séculos a seguir.

Cosmos:
“Todo-Ordenado”,
“Todo-Belo”.
Fonte: <https://thearchinsider.com/importance-of-golden-ratio-in-architecture/>
Crédito: Josh Stewart, Uplash



Assim, o céu foi convertido em uma abóbada, uma cúpula esférica, e o tempo cíclico recebeu uma metáfora inesquecível: o círculo. Tal como os astros se moveriam em órbitas esféricas, porque perfeitas, o Tempo – que Platão chama de “imagem móvel da eternidade” – exibiria a forma irretocável da circularidade. Seu discípulo (e rival) Aristóteles manterá a esfericidade essencial do Cosmos e denominará o Tempo de “medida do movimento”, confirmando sua reiteração circular. De fato, o tempo aristotélico continuará a ter como modelo o ciclo, uma vez que os movimentos celestes perfeitos são cíclicos. Eventualmente esses ciclos se completarão numa espécie de grande ano cósmico.

O Cosmos Dual de Aristóteles.
 Fonte: <https://www.jw.org/en/library/magazines/awake-no5-2016-october/aristotle-view-of-universe/>
 Crédito: *Harmonia Macrocosmica* de Andreas Cellarius (1660)



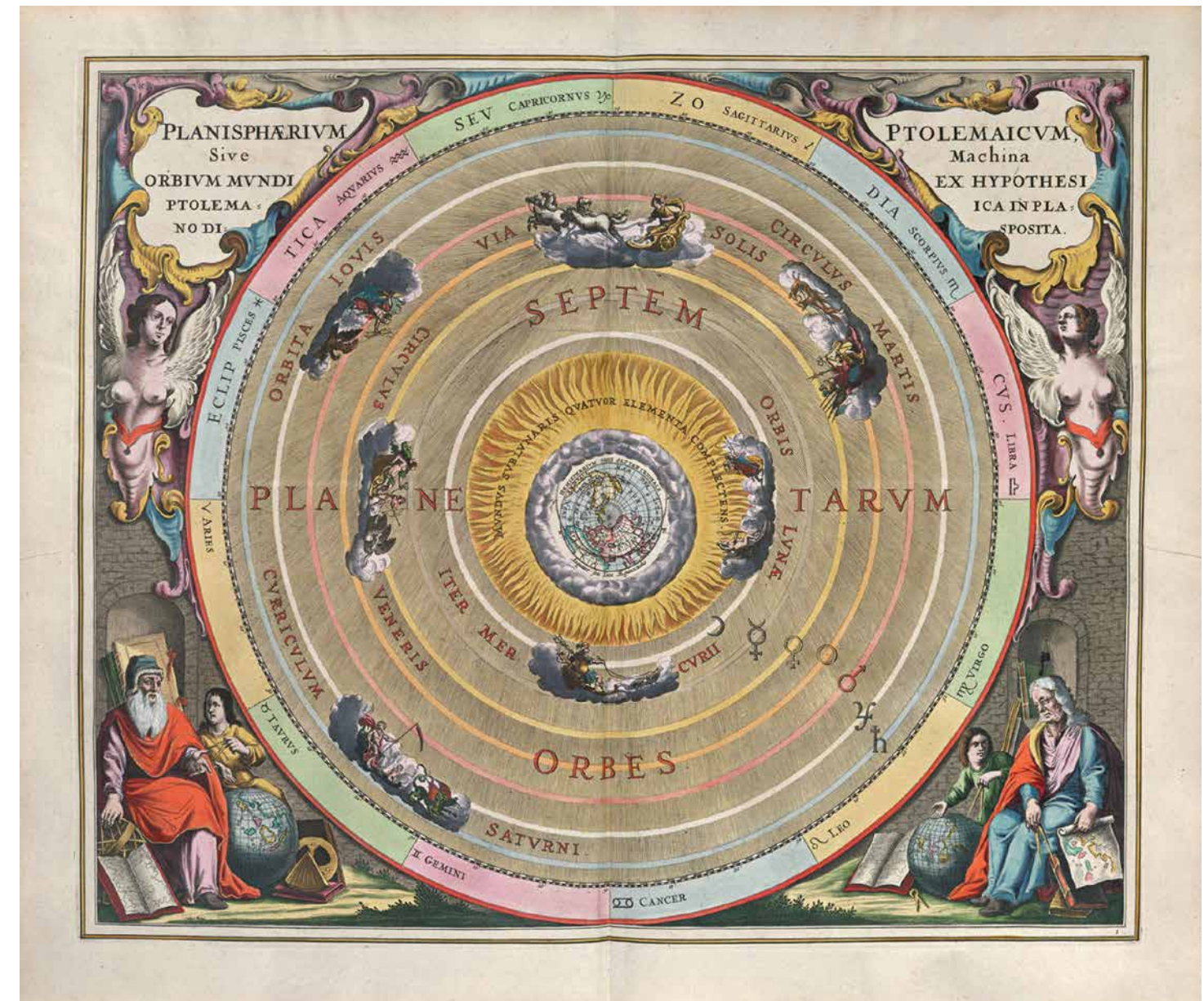
Contudo, numa evolução decisiva no século 2º da Era Comum, no cadinho de culturas e tradições ocidentais e orientais que era Alexandria, esta concepção cosmológica qualitativa – geometricamente inspirada e advinda da filosofia helênica – encontrou-se com a astronomia observacional muito precisa dos babilônios e, em particular, com a aritmética de base sexagesimal (muitíssimo mais manejável que a dos gregos) que estes empregavam.

A Grande Síntese:
Geometria Grega,
Astronomia
Mesopotâmica.
Fonte: <https://www3.astronomicalheritage.net/index.php/show-theme?idtheme=12>
Crédito: *Estela cuneiforme babilônia descrevendo um eclipse solar total ocorrido em 136 AEC, British Museum 45745*



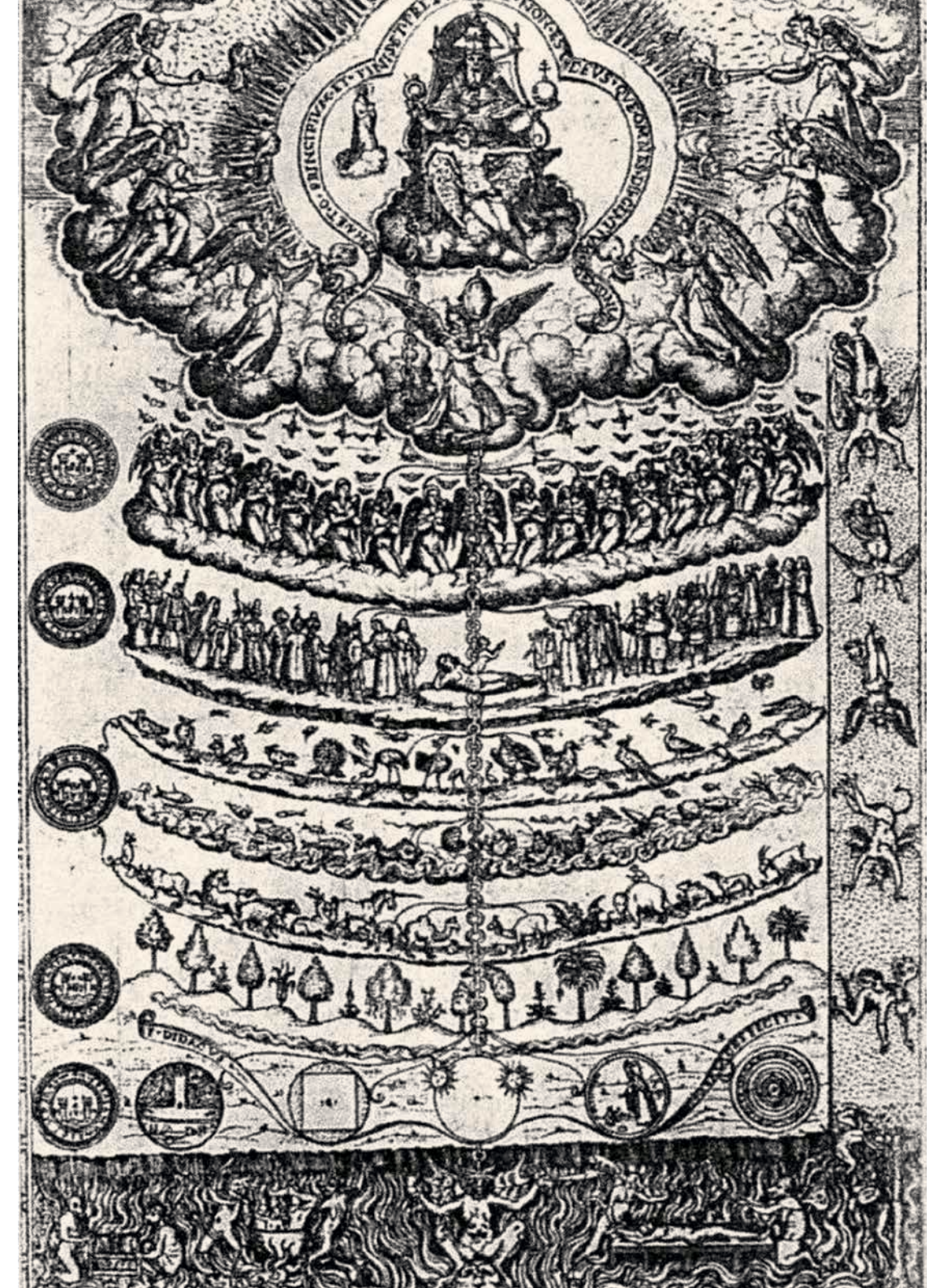
Dessa mescla entre esquema geométrico, medições detalhadas e agilidade de cálculo resultou uma das grandes obras do pensamento Antigo, o “Almagesto” (“O Grande Tratado”) de Ptolomeu. Primeiro modelo descritivo e preditivo da Física Matemática, o Cosmos de Ptolomeu permitia representar quantitativamente os movimentos dos astros errantes (suas “revoluções”) através da concatenação de sucessivas rotações (os “epiciclos”, assentados sobre círculos básicos ou “eferentes”), cuja resultante podia ser projetada como uma linha (a “trajetória”) numa carta ou planisfério. Gerações de astrônomos aperfeiçoaram este arranjo de ciclos e epiciclos, complicando-o cada vez mais. O esforço de Copérnico, no século 16, não visava senão simplificar essa barafunda de esferas engrenadas em esferas, mas acabou, como veremos, por assinalar uma mudança da própria civilização.

Ptolomeu: O Orbe
Geocêntrico.
Fonte: https://www.staff.science.uu.nl/~gent0113/cellarius/images/hm/hm_01.jpg
Crédito: *Harmonia Macrocosmica* de Andreas Cellarius (1660)



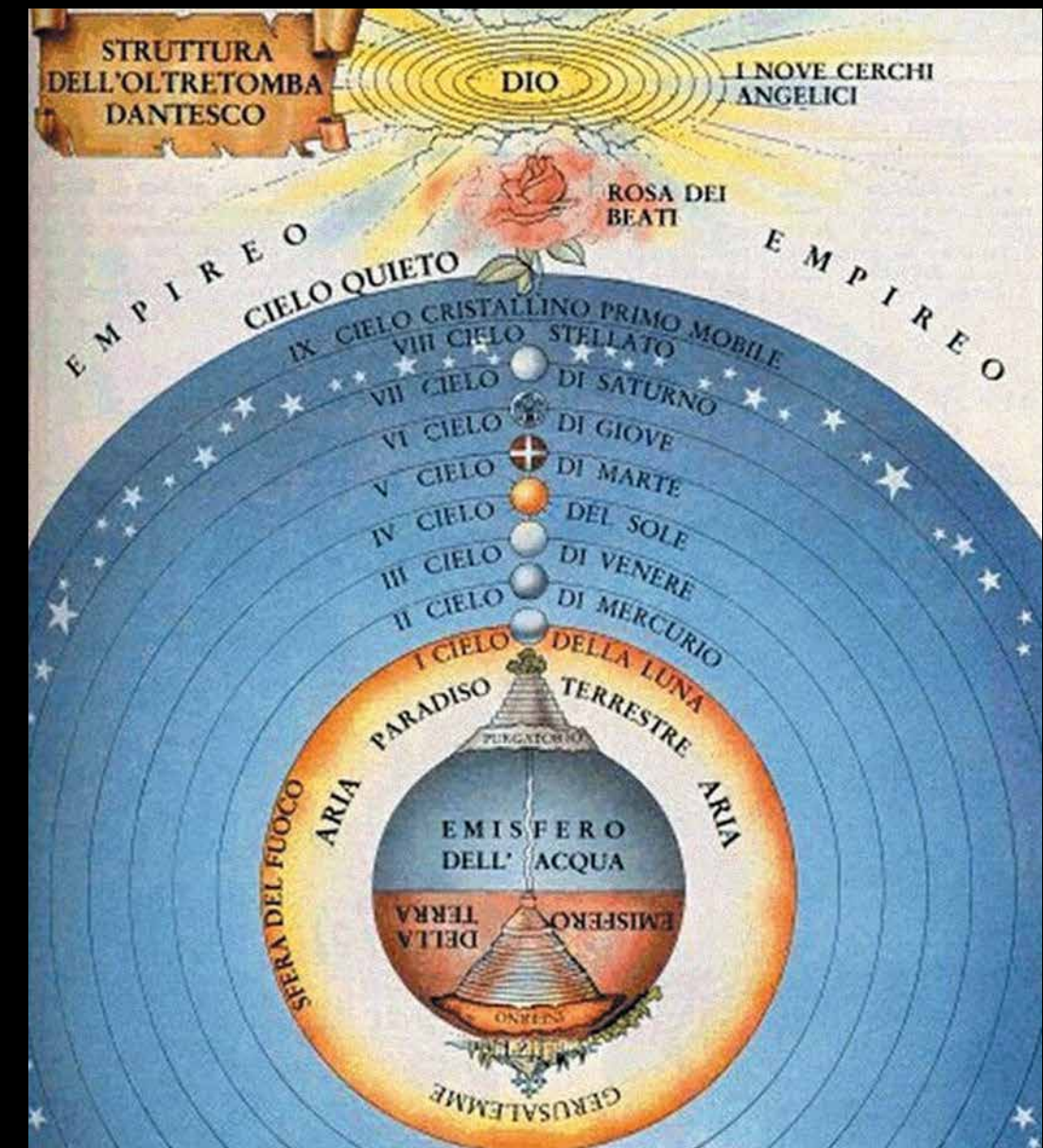
A concepção de Todo vigente na Idade Média europeia – representada pelo magnífico Cosmos de Dante – resultou da conciliação da tradição helênica do tempo cíclico com a concepção judaico-cristã de um tempo linear, amplamente difundida pela Bíblia, segundo a qual o mundo teve um começo e terá um fim. De fato, a cosmografia que Dante nos apresenta envolve a associação entre dois reinos ou domínios distintos, o material e o espiritual. Estes são regulados pela imagem nuclear da cosmovisão medieval, a Grande Cadeia dos Seres – segundo a qual todo e qualquer acontecimento se subordina a uma ordem cósmica global – manifesta numa hierarquia de formas, da mais grosseira à mais elevada. Nenhum evento pode ocorrer que não seja um reflexo dessa ordem cósmica, por isso o terror dos cometas e dos meteoros, que surgem inesperadamente no céu e invariavelmente indicam a vinda de catástrofes para reinos e pessoas.

A Grande Cadeia dos Seres.
Fonte: <https://www.khanacademy.org/humanities/art-americas/new-spain/viceroyalty-new-spain/a/engravings-in-diego-de-valadss-rhetorica-christiana>
Crédito: Diego Valadés, "The Great Chain of Being", em *Rhetorica Christiana* (1579)



A figura de uma dupla natureza – material e espiritual – con-substanciada na Grande Cadeia dos Seres corresponde, na Divina Comédia, à figura de um Cosmos finito, fechado sobre si, e hierarquizado formalmente. Com efeito, a essência formal de cada ser prescreve seu lugar numa hierarquia vertical. Há a profundidade infernal, a superfície da Terra – onde ressalta o monte do Purgatório, compondo o mundo sublunar –, e em seguida vem a sucessão de cascas cristalinas concêntricas (as órbitas), em que estão engastados os astros errantes ou planetas (inclusive o Sol e a Lua), culminando na abóbada das estrelas fixas. Envolvendo esse domínio supralunar – remanescente do Cosmos geométrico de Ptolomeu – encontra-se a derradeira expressão da corporalidade, a camada denominada de Primum Mobile, que preenche a separação entre os reinos físico e espiritual e tem a função de realizar a causa inicial (o “Primeiro Motor”) dos movimentos requerida por Aristóteles. Para além, estende-se o reino incorporeal celeste, o Empíreo, habitado pelas almas bem-aventuradas, pelos querubins, anjos e arcanjos da tradição cristã, e dominado pelo “fulgor obscuro”, na expressão inesquecível de Dante, da suprema Trindade.

Helenismo e
Cristianismo: O
Cosmos de Dante
Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Struttura_dell%27oltretomba_dantesco.jpg
Crédito: autor desconhecido



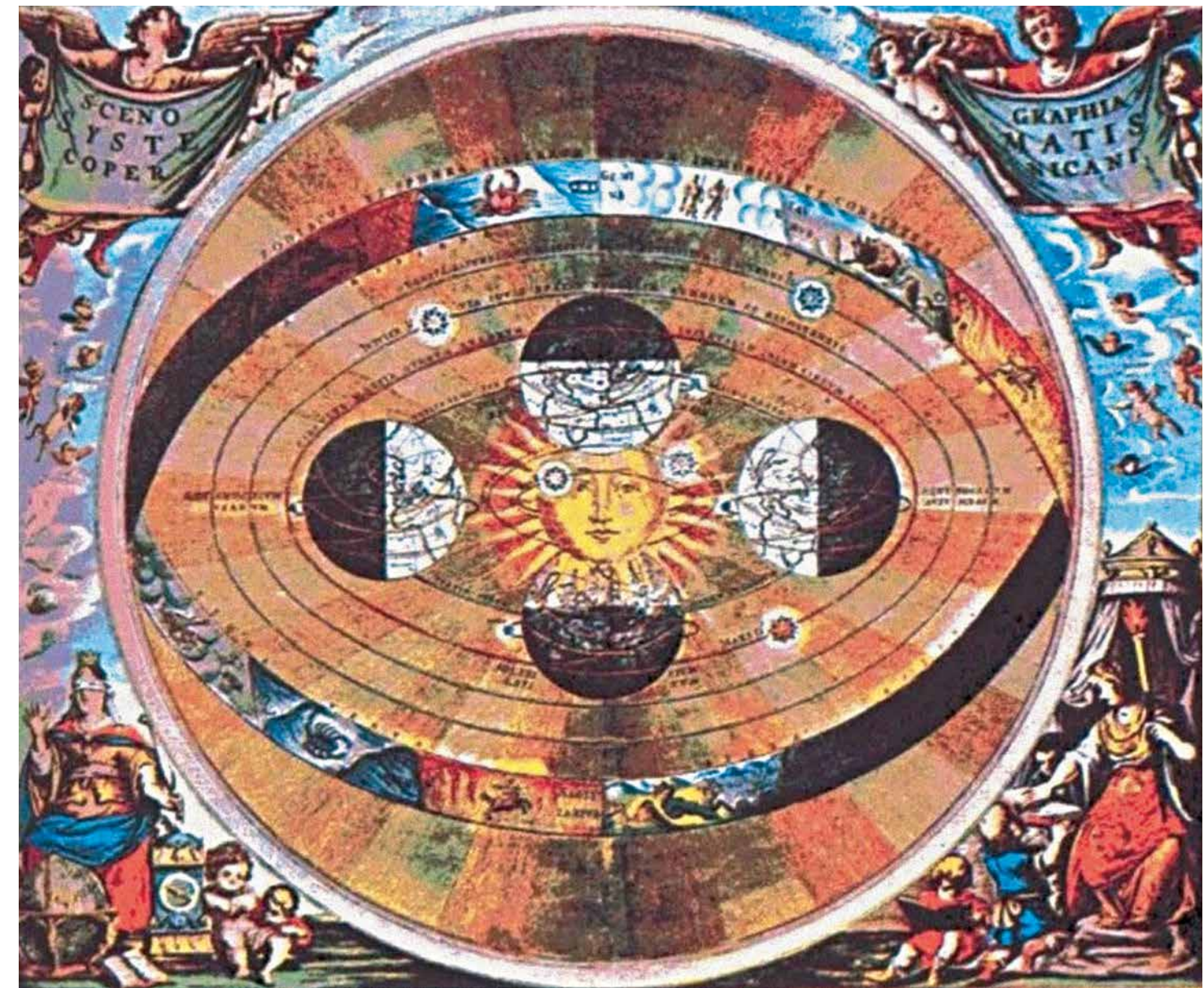
Esta magnífica imagem de um Cosmos a um só tempo orgânico e sublime sofrerá um golpe demolidor no Renascimento. Enquanto artistas do porte de Giotto e Masaccio renovavam os modos da representação artística, pensadores inquietos como Tommaso di Campanella e Nicolau de Cusa questionavam como o Céu astronômico se encontrava e se distinguia do Céu Celestial. A fronteira entre eles seria fluida ou cerrada? Cusa, escudado por seu prestígio como cardeal, sugeriu que a transição se daria suavemente: as estrelas, dizia ele, seriam a residência dos anjos. Signos de uma autêntica refundação do pensamento do Ocidente sobre o mundo natural, já antecipada pela mudança na cor dos tetos das catedrais góticas – do dourado celestial para o azul sensível –, estes questionamentos sobre os limites do mundo acabariam por desembocar na obra revolucionária de grandes reformadores como Copérnico e Giordano Bruno.

Do Mundo Fechado ao
Universo Infinito.
Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Universum.jpg>
Crédito: Camille
Flammarion,
"L'atmosphère
: météorologie
populaire", Paris
(1888), colorizada por
Hugo Heikenwaelder,
Viena (1988)



Já na Antiguidade, Aristarco de Samos havia proposto que o Sol, e não a Terra, deveria ser o centro dos movimentos planetários. O sucesso do modelo geocêntrico de Ptolomeu, porém, fez com que essa ideia fosse abandonada e considerada herética durante séculos. Nicolau Copérnico, ao reintroduzir a concepção heliocêntrica, não visava senão superar as dificuldades de cálculo trazidas pela parafernália de epiciclos dentro de epiciclos que astrônomos anteriores haviam acrescentado ao cosmos de Ptolomeu, com vistas a aperfeiçoar seu poder descritivo. Fiel aos ideais platônicos de uniformidade do movimento dos objetos celestes, Copérnico incomodava-se com as velocidades variáveis – exigidas por essa multiplicação de epiciclos –, que os astros deveriam adotar ao girar em volta da Terra. Sob pretexto de “facilitar” os cálculos envolvidos, sugeriu então, como “hipótese simplificadora”, centrar-se os movimentos celestes não na Terra, mas no Sol.

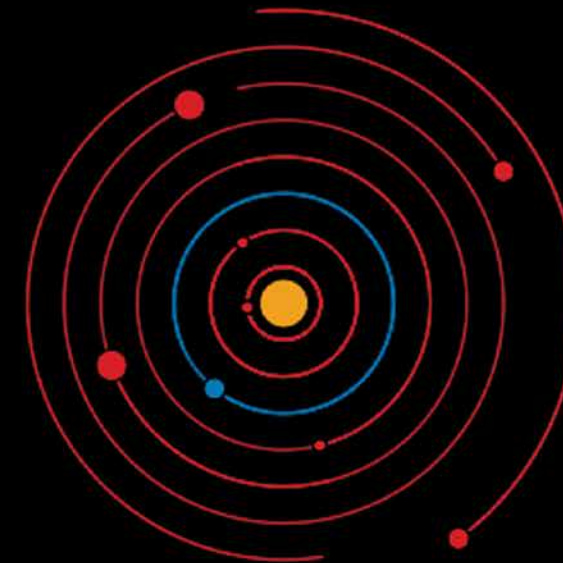
Copérnico: O Retorno
do Heliocentrismo.
Fonte: <https://www.universetoday.com/33113/heliocentric-model/>
Crédito: *Harmonia
Macrocosmica*
de Andreas
Cellarius (1660)



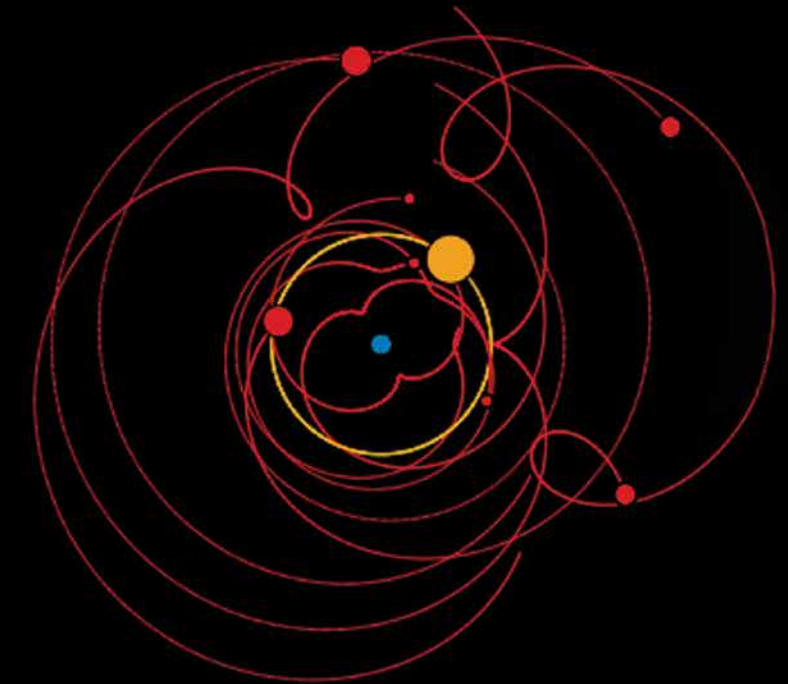
Em vida, Copérnico relutou em autorizar a publicação de seus escritos. Após sua morte, porém, deu-se a “traição” de seu amigo Andreas Osiander, que ainda assim apresentava a proposta heliocêntrica como mera conjectura. Em breve, porém, a concepção de Copérnico iria destronar a tradição medieval. A repercussão que a obra de Copérnico, *Sobre a Revolução dos Orbes Celestes*, teve no século seguinte foi tamanha que o próprio sentido do termo “revolução” – que não designava senão a circularidade monótona e invariável dos movimentos dos astros – passou a indicar uma transformação radical, abrupta e até violenta dos fundamentos de uma época ou sistema. Galileu Galilei foi apenas um dentre muitos leitores ávidos que passaram a defender com entusiasmo a concepção heliocêntrica esboçada nesse livro, mas coube a ele concretizar, através de uma série de contribuições decisivas, o desmantelamento definitivo da velha imagem de mundo geocêntrica.

Razão: A Facilidade
de Cálculo
Fonte: <https://www.malinc.se/math/trigonometry/geocentrismen.php>
Crédito: Malin
Christersson (2019)

HELIOCENTRISMO

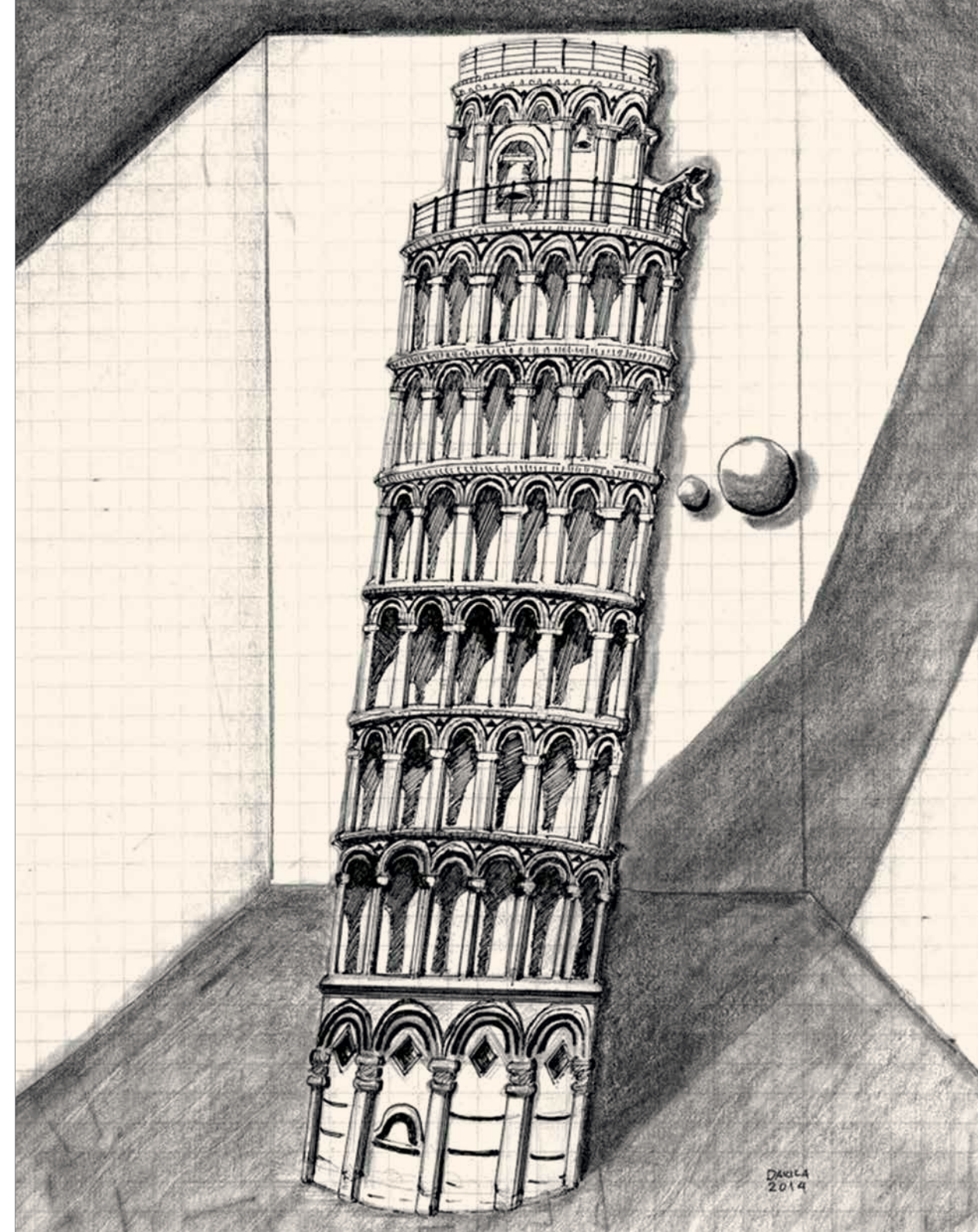


GEOCENTRISMO



Na qualidade de engenheiro militar, Galileu se dá conta de que aumentar a carga de pólvora de um canhão disparado horizontalmente de uma torre faz com que o alcance do projétil aumente, mas o tempo de voo da bala permanece (aproximadamente) o mesmo. Em seguida, ele descobre que este tempo é também o que a bala, simplesmente largada da torre, leva para chegar ao solo. Há, portanto, uma relação quantitativa entre a altura de que um corpo é largado e a duração de sua queda (e ainda com a velocidade com que atinge o chão). A “essência formal” ou forma que governaria os movimentos é assim substituída por uma fórmula matemática. As célebres (mas talvez nunca realizadas) experiências dos diferentes corpos largados do alto da Torre de Pisa visam demonstrar que todos os corpos caem do mesmo modo. Doravante, a universalidade residirá não na forma do corpo – se tem a nobreza do ouro ou a vulgaridade do chumbo – mas sim no comportamento do corpo, matematicamente regrado.

Do Corpo que Cai para
a Queda dos Corpos.
Fonte: <http://dakilavista.blogspot.com/2014/05/campanile-del-duomo-di-pisa-freefall.html>
Crédito: *Dakila*
(<https://www.blogger.com/profile/09194594795744140607>)



Ainda mais significativa é a conclusão seguinte, em que Galileu anuncia que um corpo abandonado a si próprio manteria seu estado de movimento. Consideremos uma esfera lisa que deixamos escorregar de certa altura num plano inclinado. Vemos que a esfera adquire velocidade na descida, se desloca um pouco pelo chão, e então para. Se o piso for bem encerado, como o de um palácio florentino, observaríamos a esfera, largada da mesma altura, atingir uma distância bem maior. Aqui, Galileu realiza um salto conceitual de uma ousadia raras vezes igualada, e sugere: se o piso fosse um plano perfeitamente liso, um plano geométrico ideal, o corpo a que fosse emprestada essa velocidade poderia jamais cessar seu movimento, isto é, se moveria perpetuamente. É importante notar que invariavelmente vemos as coisas saírem de um ponto e pararem em outro, quer dizer, ninguém jamais observou este movimento interminável suceder – trata-se, na verdade, de vislumbrar o fenômeno “purificado”, apreendido em sua essência. Galileu, revelando sua inspiração platônica, defenderá resolutamente a predominância dessa realidade esquemática, idealizada, sobre a realidade concreta. Mas, nesse caso, desaparece, em princípio, a distinção entre movimentos celestes e terrestres, pois ambos podem ser perpétuos. Uma vez que se conceba ser possível um movimento linear que perdure – quiçá indefinidamente –, deixam de existir fronteiras invioláveis entre os orbes terrestre e celeste. Estilhaçam-se os contornos do mundo fechado medieval e inaugura-se a extraordinária concepção moderna de um espaço e de um tempo infinitos.

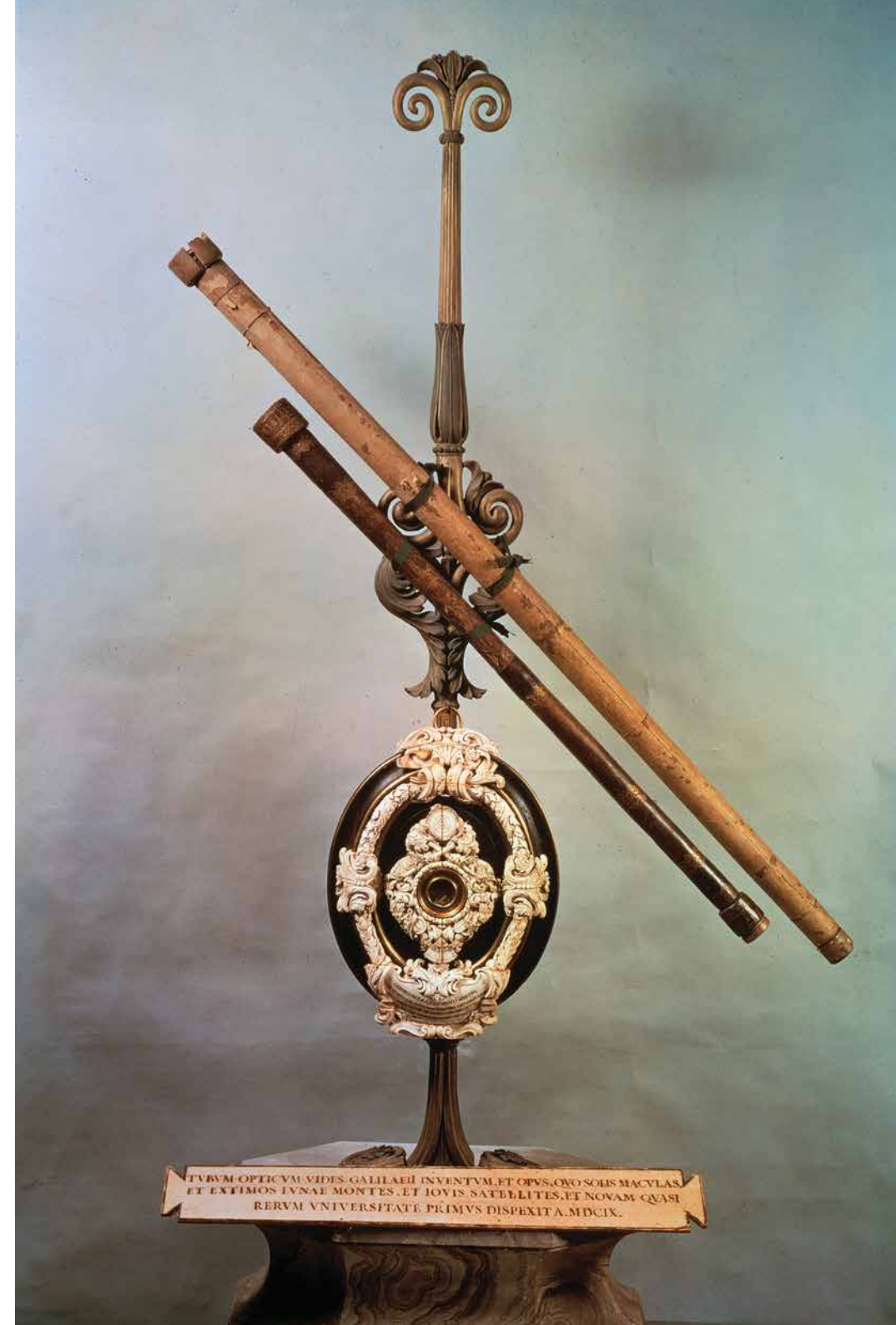
O Movimento
Ilimitado.
Fonte: [https://
catalogue.
museogalileo.it/
object/Inclined
Plane.html](https://catalogue.museogalileo.it/object/InclinedPlane.html)
Crédito: Museo
Galileo, Florença



Galileu, contudo, não parou aí. Ao receber da Holanda um arranjo de lentes dispostas sobre um suporte (o “*perspicillum*”, que logo seria chamado de telescópio), ele imediatamente o aperfeiçoou com sua habilidade de artesão. Mas o *perspicillum* era encarado até então como uma curiosidade, um dispositivo de trucagem que servia para produzir ilusões, análogo a um caleidoscópio de brinquedo. Quando era apontado para um objeto, este não apenas era aparentemente “trazido para perto” como aparecia invertido, de cabeça para baixo, ainda que não tivesse sido tocado – prova evidente da natureza de truque de prestidigitação, ou mesmo da “índole diabólica” do ardiloso artefato.

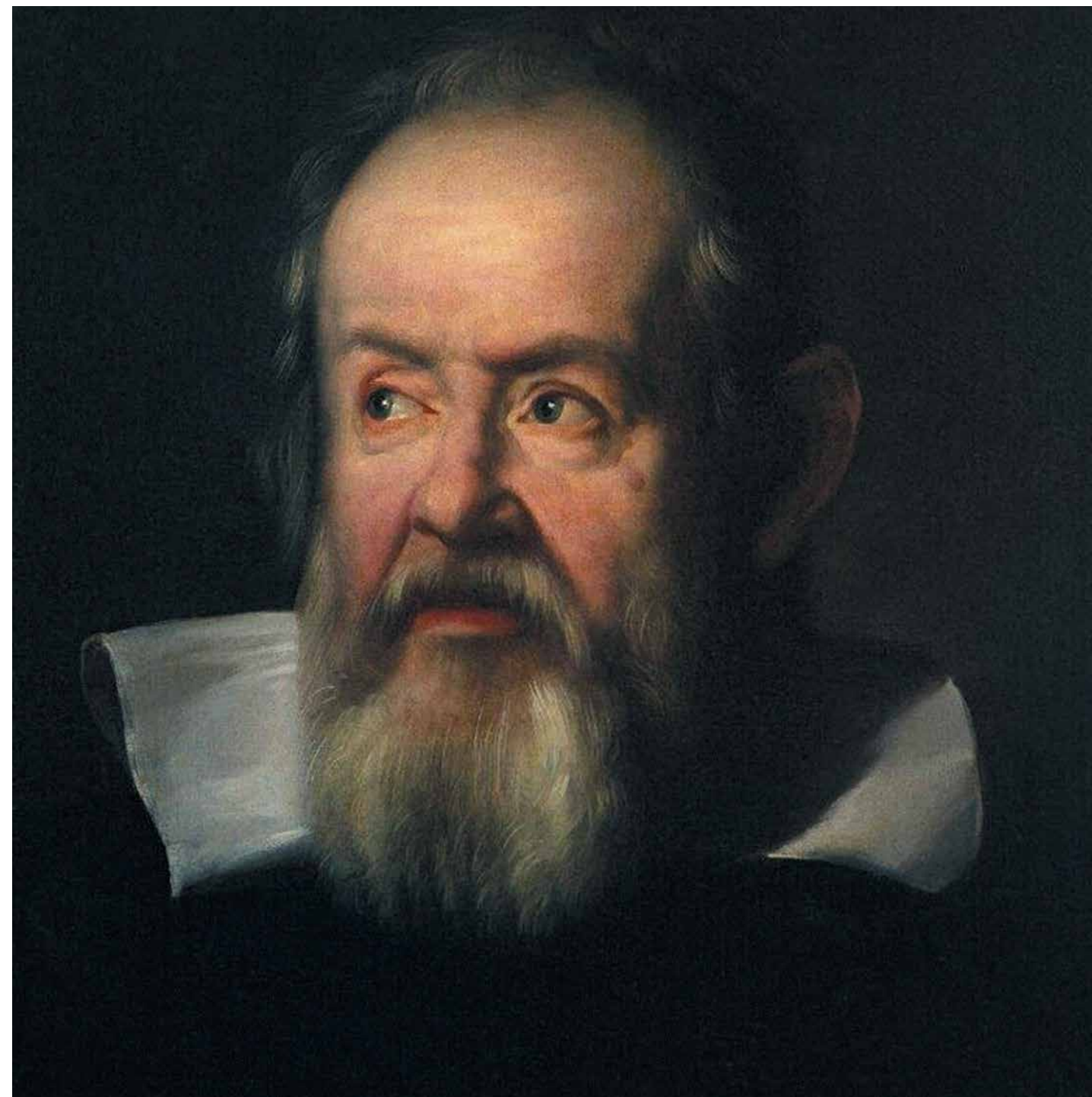
Galileu, porém, empreende um verdadeiro programa de experimentação sistemática, conferindo cuidadosamente se as características do alvo, tal como surgiam na imagem ampliada exibida pelo telescópio e por ele desenhadas em seu caderno, coincidiam fielmente com a realidade. Ele repetiu esta comprovação centenas de vezes, até se certificar que o telescópio não produzia ilusões: a imagem obtida era uma representação fidedigna do objeto observado. Com este procedimento metódico, Galileu transformou o telescópio de um mero brinquedo em um instrumento de observação.

O Telescópio:
de Brinquedo a
Instrumento.
Fonte: https://www.mpg.de/7913340/Galileo_Galilei_telescope
Crédito: Dpa-
Picture Alliance



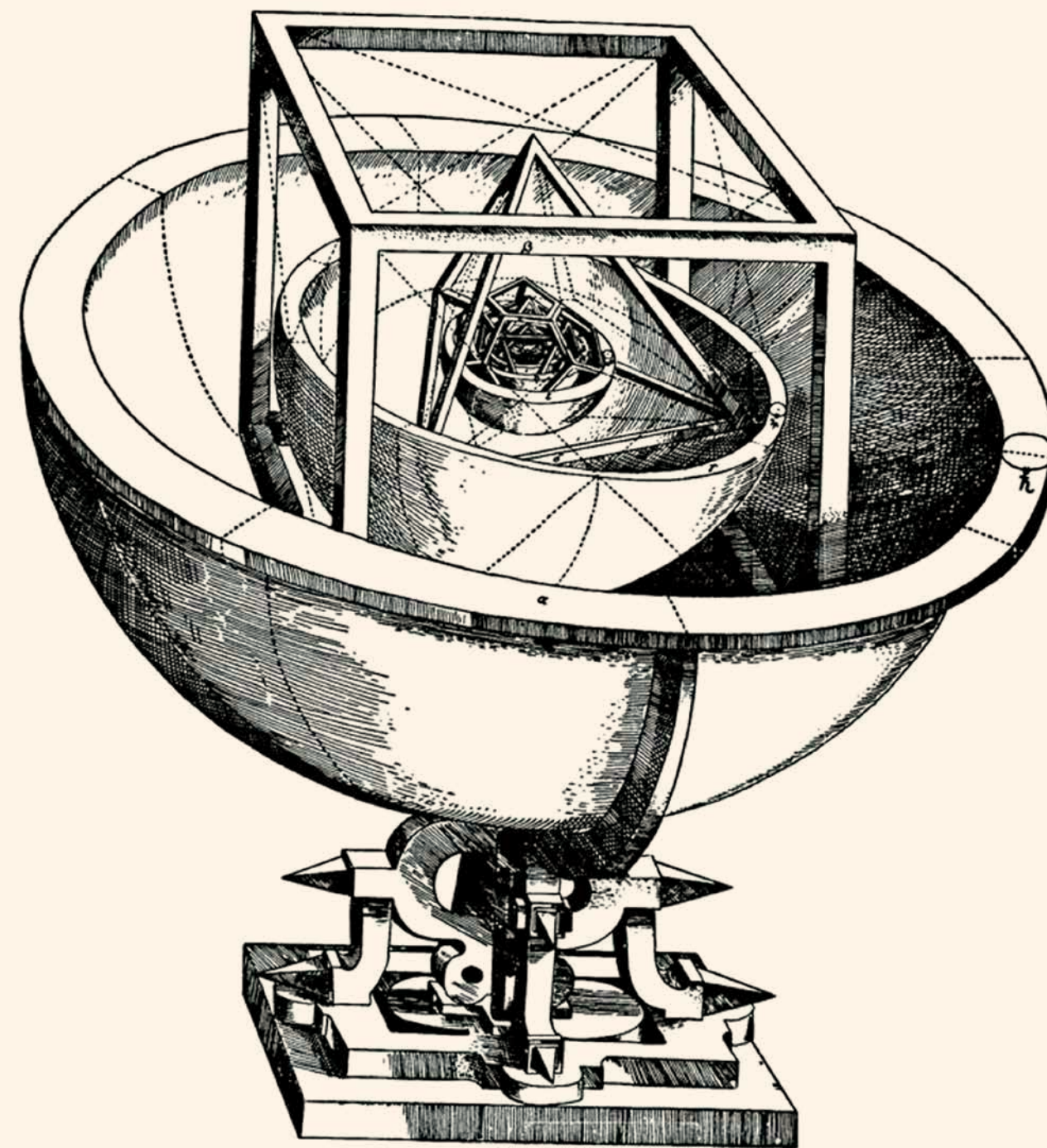
Quando enfim aponta sua luneta para o céu, Galileu está seguro de que tudo o que vir será real. Descobre incontáveis novos astros, distingue montanhas na lua e registra satélites girando em torno de Júpiter. Ou seja: expande os limites do Cosmo aristotélico, abole a diferença de natureza entre os mundos sub e supralunar e demonstra que há mais de um centro de movimentos. Em “O Mensageiro das Estrelas”, ele apresenta de uma só vez tais “coisas que ninguém nunca viu antes” e exprime “pensamentos que ninguém nunca teve”. O arrebatamento de Galileu perante a conquista que lhe foi concedida é enorme! Ele havia sido agraciado com o privilégio de fazer nascer um novo mundo das cinzas da visão aristotélica – que era sancionada pela Igreja. Levado às barras do tribunal da Inquisição, renega o heliocentrismo, mas tem a íntima convicção – que a Era Moderna irá impor – de que o mundo, agora, se move.

Coisas que Ninguém
Pensou Antes:
Galileu Galilei.
Fonte: <https://www.uffizi.it/en/artworks/portrait-galileo-galilei-by-justus-sustermans%20>
Crédito: *Le Gallerie degli Uffizi, Florença*



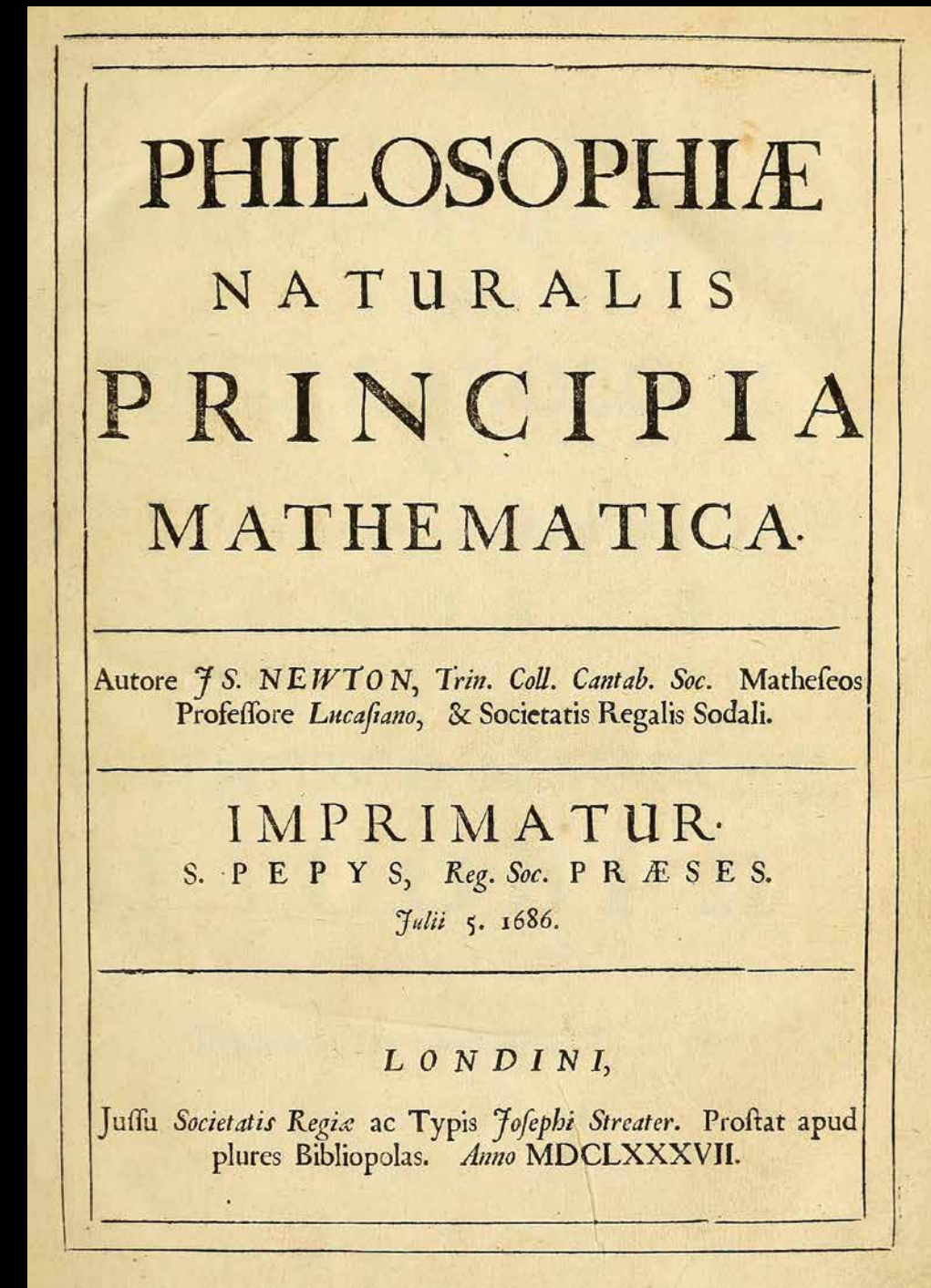
Galileu desenvolve, portanto, uma nova maneira de investigar e conhecer o mundo natural: a partir de experimentos e observações empíricas dos fenômenos, busca-se elaborar regras quantitativas (expressas, portanto, em linguagem matemática) capazes de correlacionar as grandezas relevantes para a caracterização teórica (ou seja, universal) desses eventos, incorporando para tanto os dados medidos (no caso do movimento de um corpo, por exemplo, as velocidades, distâncias e durações observadas). É esta abordagem empírico-teórica que Johannes Kepler, num dos maiores feitos da história das Ciências, emprega para extrair das tabelas de observações astronômicas de Tycho Brahe as leis cinemáticas que descrevem as trajetórias dos planetas no Sistema Solar. Representando uma autêntica refundação do pensamento do Ocidente sobre o mundo natural – ao implicar o destronamento da herança aristotélica em favor de uma concepção platônica –, esse conjunto de inovações foi sintetizado em uma célebre sentença do próprio Galileu, que os séculos seguintes não esquecerão: *“Deus escreveu o Livro da Natureza em linguagem matemática; trata-se doravante, para o entendimento, de decifrar essa linguagem”*.

“O Livro da Natureza
Está Escrito
em Linguagem
Matemática”.
Fonte: [https://
www.atnf.csiro.au/
outreach/education/
senior/cosmicengine/
renaissanceastro.html](https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/cosmicengine/renaissanceastro.html)
Crédito: Johannes
Kepler, *Mysterium
cosmographicum*
(1596)



A partir das contribuições de gigantes como Galileu, Kepler e Descartes, Isaac Newton combina estas concepções modernas de espaço, tempo e movimento e as promove a um patamar ainda mais abstrato em sua grande síntese das leis dinâmicas, a Mecânica. O cenário básico do mundo, agora, consiste de um espaço geométrico euclidiano, essencialmente vazio, e possivelmente infinito, em que corpos materiais se deslocam, impelindo uns aos outros pela ação mútua de agentes de modificação eficiente dos comportamentos, denominados forças, ao longo de uma linha indefinidamente extensa de instantes, isto é, de pontos de tempo. Para Newton, esta linha de tempo é universal, uniforme e absoluta – quer dizer, todas as regiões do espaço são englobadas pelo mesmo instante, os instantes se sucedem sempre na mesma cadência e, como em cada instante haverá uma dada distribuição de corpos no espaço, o “transcurso do tempo” será caracterizado pela diferença na distribuição espacial dos objetos. Estas são características típicas de um sistema mecânico. O Universo, então, torna-se similar a uma grande máquina.

Newton: A Máquina
do Mundo
Fonte: [https://
upload.wikimedia.
org/wikipedia/
commons/1/17/
Principia-title.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Principia-title.png)
Crédito: [wikimedia.org](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Principia-title.png)

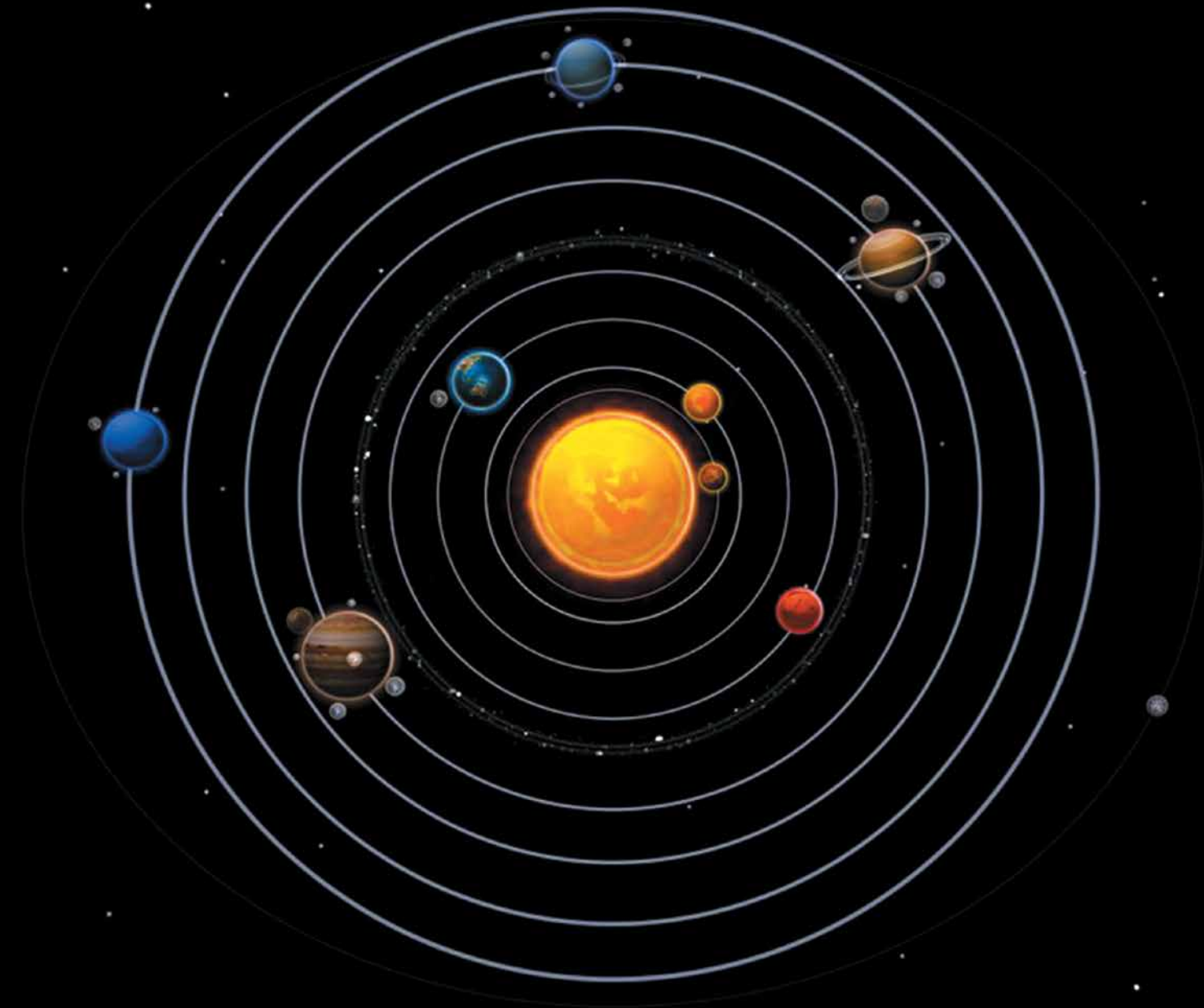


Chegamos assim à imagem mecânica do mundo, que vigorou até

os fins do século 19: o Universo seria comparável a um vasto mecanismo, cujo funcionamento é rigorosamente determinado (e, por conseguinte, inteiramente predizível) em virtude da concatenação exata de suas peças, de suas partes simples, pela ação recíproca de forças mecânicas. A história universal, a história do Cosmos, não passaria de uma série de “instantâneos”, cada um retratando uma dada configuração dos corpos no espaço, como um conjunto de engrenagens perfeitamente ajustadas e azeitadas que, ao se movimentarem, assumem de instante a instante uma disposição diferente. Esta concepção teve como um de seus maiores sucessos a determinação da composição e operação do sistema planetário em que a humanidade surgiu: o Sistema Solar.

Mas se a aventura do conhecimento teria, aparentemente, chegado ao fim – se basta conhecer a composição material e o diagrama de forças atuantes em um sistema para saber tudo sobre ele – o novo século 20 logo testemunharia a realização de experimentos decisivos e teorizações audaciosas que viriam a demonstrar a inadequação da imagem mecânica para uma variedade de aspectos básicos do natural. É esta revolução que exploraremos a seguir.

O Sistema Solar.
Fonte: https://www.researchgate.net/figure/A-birds-eye-view-of-our-solar-system-not-to-scale-Abastris-nd_fig3_284672834
Crédito: Michael Quinton, Edinburgh Napier University



OSCAR T. MATSUURA

AS EXPEDIÇÕES

SOBRAL NO FOCO
DO MUNDO:
CIDADE CEARENSE
ACOLHE EXPEDIÇÕES
CIENTÍFICAS

Em 1919 três expedições científicas alterariam completamente a rotina da pequena Sobral, no centro-oeste semiárido do Ceará, e revolucionariam incontestavelmente a ciência mundial. A cidade, então com cerca de 10 mil habitantes, foi palco de estudos de comitivas de três países – Brasil, Inglaterra e Estados Unidos – em torno do eclipse total do Sol, ocorrido no dia 29 de maio. As expedições tinham objetivos diferentes, mas a britânica chamou a atenção do mundo anunciando depois a comprovação de uma previsão de Einstein, da sua Relatividade Geral, com base na observação desse eclipse. E marcaram para sempre a história de Sobral.

A expedição brasileira – do Observatório Nacional (ON) do Rio de Janeiro – levou instrumentos para coletar dados sobre a atmosfera solar para estudos na área de Física Solar. O líder da expedição, Henrique C. Morize (1860-1930), diretor do ON, foi o anfitrião que cuidou da logística das expedições. Francês naturalizado brasileiro, Morize, foi engenheiro industrial e catedrático de Física Experimental da Escola Politécnica do Rio de Janeiro e já trabalhava no ON desde 1891.

A expedição britânica – com membros do Real Observatório de Greenwich – veio fotografar as estrelas que apareceriam em volta do Sol eclipsado. Se Einstein não estivesse equivocado, sua previsão de que a trajetória da luz seria desviada pelo forte campo gravitacional do Sol poderia ser confirmada pelo deslocamento das estrelas nas fotografias do eclipse, ao serem comparadas com fotografias dessas mesmas estrelas obtidas numa noite comum, fora do eclipse, quando a luz das estrelas não sofre o desvio. Para essa observação, o Sol era apenas um objeto massivo, com intensa gravidade, e o eclipse oferecia o obscure-

cimento do céu para que estrelas distantes, cujos raios de luz passam rasantes ao Sol antes de chegarem à Terra, pudessem ser registradas fotograficamente. O objetivo científico era o de confirmar a Teoria da Relatividade Geral, que se tornaria pilar da Cosmologia Moderna.

A expedição norte-americana – do Departamento de Magnetismo Terrestre da Instituição Carnegie de Washington – tiraria partido da interrupção dos raios X e da radiação ultravioleta do Sol, que aconteceria durante o eclipse, para medir os possíveis efeitos na eletricidade atmosférica e da crosta terrestre e no magnetismo terrestre. O objetivo fazia parte do estudo da Física da Terra ou Geofísica. Segundo Morize, Louis A. Bauer (1865-1932), diretor do departamento norte-americano, o teria consultado perguntando se ele mesmo poderia fazer medidas elétricas e magnéticas durante o eclipse em Sobral. Mas Morize teve que responder negativamente, por exiguidade de pessoal disponível e de instrumental adequado. Foi assim que Bauer decidiu enviar a expedição dos Estados Unidos para Sobral.

UM ECLIPSE IDEAL

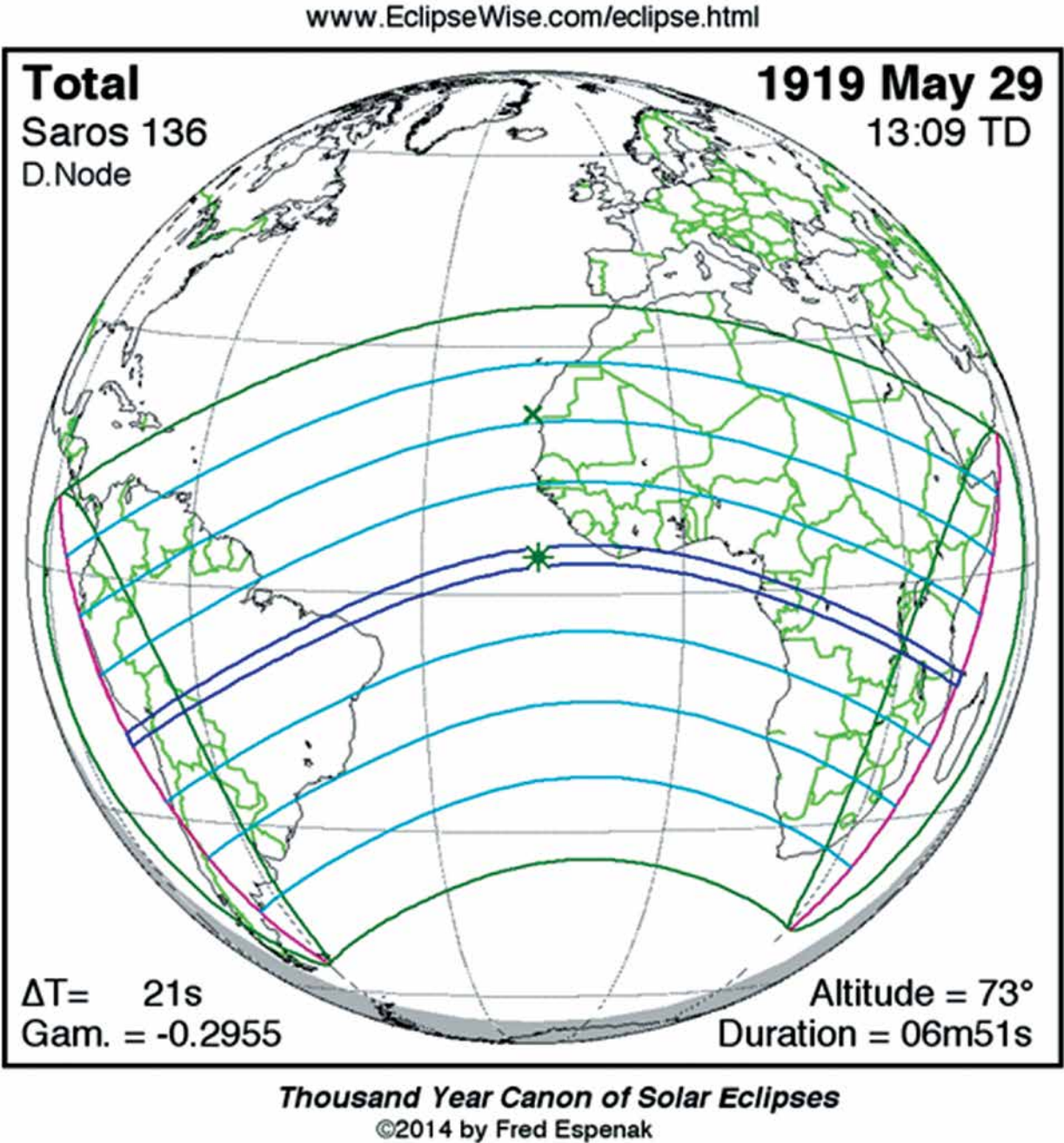
Tinha se tornado comum entre os astrônomos organizar expedições quando os observadores tinham que se deslocar com os seus instrumentos aos locais onde um fenômeno podia ser observado. Isso era feito não só para eclipses solares como também para os trânsitos na frente do disco solar dos planetas internos à órbita da Terra: Mercúrio e Vênus.

O eclipse de 1919 foi considerado especialmente favorável para a detecção da deflexão gravitacional da luz (para simplificar, chamaremos de *efeito Einstein*). Primeiro, porque a duração do evento era longa. A máxima duração teoricamente possível da totalidade de um eclipse solar é de 7min32s. A duração desse eclipse foi de 6min51s. A duração longa possibilita expor um número maior de placas fotográficas durante o eclipse. Em segundo lugar, neste eclipse o Sol, em seu circuito anual pela esfera celeste, passava por um campo rico de estrelas: o aglomerado estelar aberto das Híades, o mais próximo da Terra. Isso possibilitaria medir a deflexão da luz em um número maior de estrelas.

As condições para observar a totalidade do eclipse são favoráveis quando o Sol se encontra com boa elevação acima do horizonte, isto é, por volta do meio-dia local. Mas isso aconteceria ao meio do Atlântico Sul. Assim, era natural que fosse escolhida uma cidade do Ceará, último estado brasileiro antes da sombra começar a atravessar o Atlântico Sul. Uma condição igualmente favorável se repetiria no oeste da África.

Na busca por um local adequado para a observação do eclipse, duas boas cidades encontravam-se no litoral do Ceará: Fortaleza e Camocim. Mas elas estavam quase na borda da faixa de totalidade. Aí o disco so-

Figura 1. Eclipse total do Sol de 29/5/1919. Em azul escuro, os bordos da faixa de totalidade do eclipse, cuja largura era cerca de 244 km. Em azul claro, ao norte e ao sul da faixa de totalidade, os locais em que o eclipse foi 75%, 50%, 25% parcial e, em verde, os limites norte e sul do eclipse. A sequência de curvas verde, violácea e verde à esquerda indica os lugares onde, ao nascer do Sol, o eclipse está, respectivamente, no fim, no meio e no início. A sequência à direita indica os lugares onde, ao pôr do Sol, o eclipse está respectivamente no fim, no meio e no início. No fino crescente em cinza, no bordo inferior, é noite. O símbolo * indica o local em que a duração da totalidade do eclipse é máxima: 6 min 51 s. Crédito: Adaptação de www.EclipseWise.com/eclipse.html por Fred Espenak.



lar seria totalmente eclipsado, mas por um tempo muito breve. É que a duração da totalidade decresce conforme se afasta da linha central da sombra. Já Sobral estava mais para o interior, a 126 km de Camocim, mas bem próxima da linha central. Aí a totalidade duraria 5 min 11,8 s.

Como não havia outras opções comparáveis ao redor em termos de infraestrutura, a escolha de Sobral parecia óbvia. Mas tentar observar o mesmo eclipse de localidades diferentes é uma forma de aumentar a chance de garantir a coleta de algum dado observacional. Por isso a expedição britânica escolheu, além de Sobral, a Ilha do Príncipe, no Golfo da Guiné.

Como um dos postos promissores para a observação desse eclipse situava-se em território brasileiro, era natural que o Observatório Nacional (ON), instituição astronômica mais tradicional do país, se tornasse anfitrião das expedições estrangeiras. Na época o ON ainda funcionava no antigo Colégio dos Jesuítas, no Morro do Castelo (figura 2), que foi arrasado por volta de 1921 durante a modernização da capital federal.

A sombra do eclipse total de 29 de maio de 1919 (figura 1) começava ao nascer do Sol ainda no Oceano Pacífico, a oeste do Peru, passando depois por esse país e pela Bolívia. Entrava no Brasil pelo estado do Mato Grosso e rumava ao Ceará. Em seguida, cruzava o Atlântico Sul, tangenciava Libéria e a Costa do Marfim, atravessava o Golfo da Guiné, cruzava a África Central – passando pela Guiné Equatorial, pela República do Congo, pela República Democrática do Congo, pela Tanzânia e pelo nordeste do Moçambique – para terminar, ao pôr do Sol, no Oceano Índico, antes de alcançar Madagascar.

Figura 2. Imperial Observatório do Rio de Janeiro no Morro do Castelo. Fonte: <https://mundogeo.com/2015/05/19/observatorio-nacional-lanca-software-de-astronomia/>



EVENTO MARCANTE PARA A ASTRONOMIA BRASILEIRA

Apesar das condições aparentemente ideais para os estudos em torno do eclipse, em 1919 a institucionalização da ciência no Brasil – país periférico onde, na época, as novidades dos países centrais chegavam com retardo de décadas – estava em amplo descompasso com o que ocorria na Inglaterra e nos Estados Unidos. Nesses países já haviam universidades e observatórios bem estabelecidos e uma comunidade científica bem representada por sociedades científicas tradicionais. A Fundação Carnegie já tinha nascido da dotação milionária de um filantropo que queria promover as descobertas científicas e se tornou modelo de um mecenato ainda raro por aqui.

No Brasil, a Sociedade Brasileira de Ciencias – atual Academia Brasileira de Ciências – era recém-criada e tinha Morize como presidente. Uma comunidade astronômica incipiente se formaria apenas por volta de 1960, quando o Estado também assumiu a implantação de uma política científica de fomento à pesquisa e à formação de cientistas. Os trabalhos de Morize no eclipse de 1919 contribuíram para tornar possível, a longo prazo, a consolidação de uma Astronomia Brasileira moderna e internacionalmente engajada. Também foi o eclipse de Sobral que colocou a Teoria da Relatividade Geral no debate acadêmico brasileiro.

1912, 1914, 1916: PRELÚDIOS FRUSTRADOS, MAS RELEVANTES

É importante ressaltar que diversas experiências anteriores à de 1919, apesar de não tão bem-sucedidas, foram essenciais para que as expedições de Sobral pudessem ter êxito anos depois.

Em 10 de outubro de 1912 aconteceu um eclipse total visível da cidade de Passa-Quatro, em Minas Gerais. O evento reuniu oito expedições na região fronteira entre os estados de Minas Gerais e São Paulo. Duas expedições eram brasileiras: uma do ON e outra do Observatório de São Paulo, hoje Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG/USP), então instalado à Av. Paulista, 69. Na época, além de sede da Diretoria do Serviço Meteorológico e Astronômico do Estado de São Paulo, esse observatório fornecia a hora oficial do estado e pretendia realizar estudos de Física Solar, Magnetismo Terrestre e Sismologia.

Morize, que já era diretor do então Observatório do Rio de Janeiro desde 1908, foi o coordenador da expedição para esse eclipse, mas nenhuma observação foi possível por conta da chuva torrencial que caiu na ocasião. No entanto, vários contatos foram feitos, o que seria muito importante para o eclipse de 1919 em Sobral.

O eclipse de 1912 contou ainda com expedições da Inglaterra e da Argentina. A expedição britânica, do Real Observatório de Greenwich, era composta por Arthur S. Eddington (1882-1944) e Charles R. Da-

vidson (1875-1970). Ambos observariam também o eclipse de 1919, mas o objetivo científico dessa expedição em Minas estava voltado exclusivamente à Física Solar: estrutura da coroa solar e espectroscopia da cromosfera e coroa. Para Eddington, que se tornaria personagem central na detecção do *efeito Einstein* sete anos depois, a observação desse efeito estava totalmente fora de pauta em 1912.

A expedição argentina foi liderada pelo americano Charles D. Perrine (1867-1951), diretor do Observatório de Córdoba, e se instalou na cidade de Cristina, também em Minas Gerais. Perrine tinha trabalhado antes no Observatório Lick, nos EUA, dirigido por William W. Campbell (1862-1938), com quem tinha adquirido experiência na observação de eclipses em quatro expedições: 1889 na Califórnia, 1900 no estado da Geórgia, 1901 em Sumatra e 1905 na Espanha.

SEM SORTE PERRINE

Perrine, que já havia se envolvido com o tema quando Einstein ainda estava ampliando o alcance da Relatividade Restrita para a Relatividade Geral – como veremos adiante – foi o primeiro a tentar, efetivamente, a detecção do *efeito Einstein* durante um eclipse total do Sol. Essa tentativa foi justamente em Cristina, mas fracassou por conta das fortes chuvas.

Ele faria uma nova tentativa no eclipse de 1914, em Feodósia, na Crimeia, também sem sucesso. Por problemas diversos, das 27 expedições ao eclipse de Feodósia, apenas sete puderam pelo menos assestar

os instrumentos para as observações, mas o maior empecilho foram as nuvens que cobriram parcialmente o Sol durante o fenômeno. Entre uma nuvem e outra, poucas imagens foram registradas, mas de pouca serventia. De qualquer forma, essas foram as primeiras imagens obtidas com o objetivo de verificar a predição de Einstein.

Para o físico alemão, no entanto, esses sucessivos fracassos foram bênçãos, porque o valor da deflexão predito por ele estava errado (era metade do valor correto). Se as observações de Perrine dessem certo à época, Einstein seria “derrubado” cientificamente.

Há provas documentais de que Eddington e Perrine se encontraram pessoalmente várias vezes no eclipse de 1912 e é praticamente impossível que o primeiro não tenha tomado conhecimento do *efeito Einstein*. Mas Eddington só teria dado conta da importância da observação desse efeito quatro anos depois.

Isso porque no início de 1916 Eddington tomou conhecimento da nova teoria de Einstein, a Relatividade Geral na versão final, e reconheceu rapidamente a sua importância. Na mesma época, como detalharemos adiante, Eddington teria chamado a atenção de Frank W. Dyson (1868-1939), Astrônomo Real, quando ambos se associaram para organizar a expedição para o eclipse de 1919. Essa expedição seria coordenada pela *Joint Permanent Eclipse Committee (JPEC)* da *Royal Society (RS)* e da *Royal Astronomical Society (RAS)*, presidida então por Dyson.

Ainda em 1916 Perrine faria uma nova tentativa de detectar o *efeito Einstein*. Desta vez durante um eclipse em Tucacas, na Venezuela, para onde conseguiu enviar uma expedição apesar de enormes dificuldades financeiras. O eclipse estava previsto para o dia 3 de fevereiro, mas por

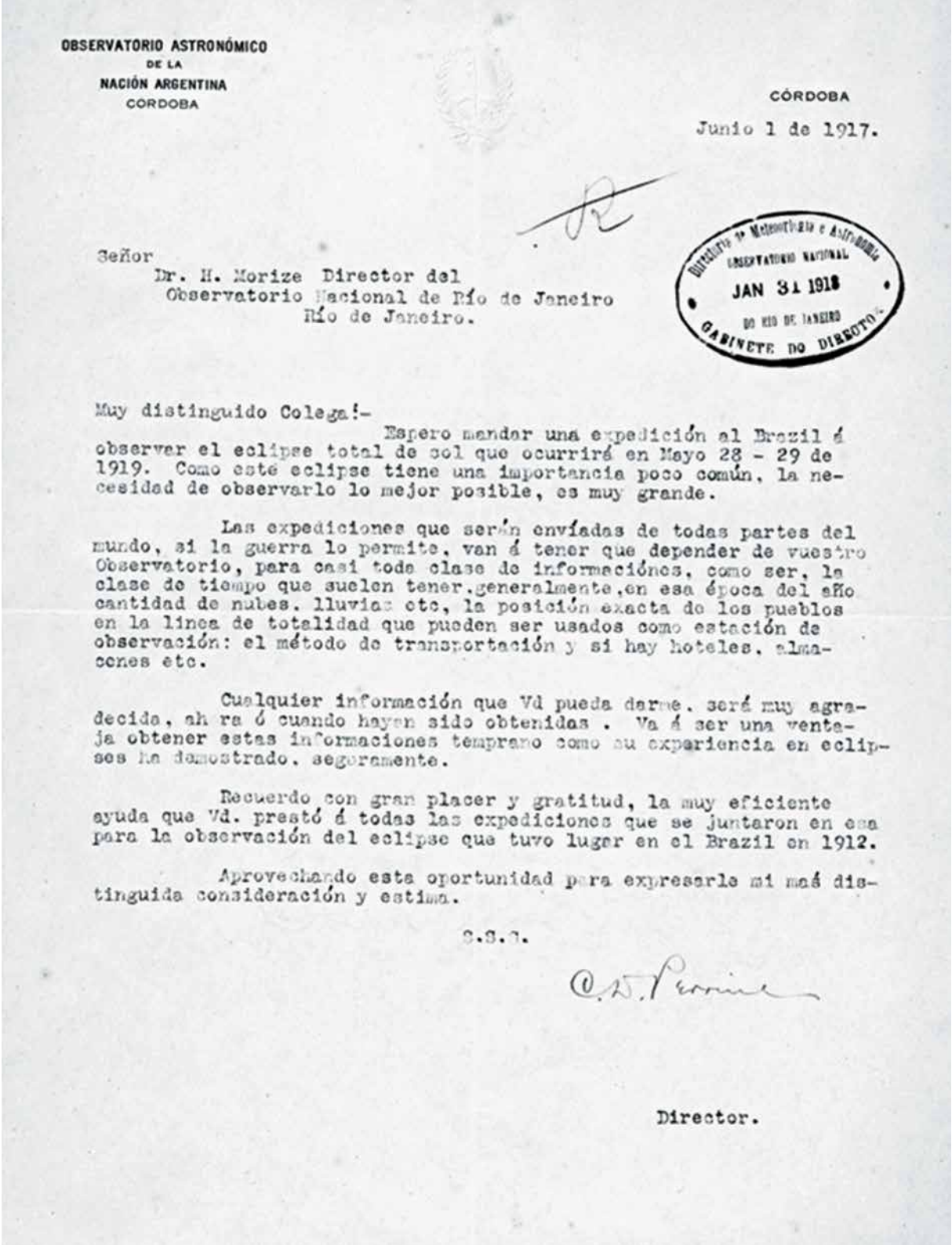
causa da I Guerra Mundial os equipamentos argentinos, que haviam sido levados para a Crimeia dois anos antes, demoraram a chegar. Só chegaram a Tucacas em 17 de março, mais de um mês após o evento. De qualquer forma, o tempo novamente não ajudou – mas desta vez já era público o valor correto da deflexão da luz de Einstein.

Apesar de todos esses fracassos, Perrine persistia na intenção de comprovar o *efeito Einsten*. Com essa intenção, ele foi um dos primeiros a solicitar a Morize, quase dois anos antes do eclipse de Sobral, informações sobre condições meteorológicas, logísticas e infraestruturais das potenciais localidades de observação do fenômeno no Brasil (figura 3).

No Acervo do MAST há um documento de Morize, de dezembro de 1917, solicitando à Seção de Meteorologia do próprio ON dados para as cidades de Teresina e Parnaíba, PI, e Caxias, MA. A resposta veio num relatório de quatro páginas manuscritas intitulado “Apontamentos sobre a zona do eclipse”, do engenheiro de telégrafo Benjamin de Oliveira, funcionário do Observatório.

O relatório avalia diversas circunstâncias do Ceará e do Piauí. Descreve o transporte marítimo por vapores e iates no Ceará e por “gaio-las” desconfortáveis no Piauí. Cita a necessidade de uso de escaler para descarga – que no litoral maranhense era feita em alto mar, por serem as águas muito baixas –, descreve os hotéis do Piauí como péssimos e o calor sufocante, além de ser uma zona em que grassava a febre amarela. O relatório informa ainda que Sobral é a segunda cidade do Ceará e cita a estrada de ferro que une Sobral a Camocim. Os hotéis nessas cidades eram descritos como “regulares”, mas com redes em vez

Figura 3. Perrine solicita informações a Morize sobre o eclipse de 1919. Fonte: “reeclipse100 anos (3) d2_0024” do Acervo do MAST.



de camas. Em Sobral a febre amarela era tida como endêmica e temia-se pelos cientistas estrangeiros, mais suscetíveis a contrair a doença. Foi então sugerido que eles fossem levados todas as tardes para as alturas mais frescas de Meruoca, distrito de Sobral (essa medida, porém nunca foi colocada em prática, nem há registro de que os cientistas contraíram a febre). O relatório fala também sobre a alimentação nos hotéis do Ceará: carne seca ou fresca e cereais no interior e bons peixes no litoral, sendo as verduras inexistentes.

Apesar desse interesse precoce, a menos de dois meses do evento Perrine escreveu para Morize afirmando que não teria condições financeiras de vir ao Brasil, consequência direta da I Guerra. Nessa carta Perrine faz menção à *eclipse Family*, que deveria ter se formado em 1912, e agradece a hospitalidade de Morize, que qualificou como “diferenciada”.

Não vindo para este eclipse, Perrine infelizmente perderia a chance de obter as imagens que, com os equipamentos que ele já tinha levado para Cristina, teriam podido testar efetivamente o efeito Einstein e, desta vez, com o valor correto.

CENÁRIO POLÍTICO-ECONÔMICO

Entre os documentos encontrados no Acervo do MAST, destacam-se ainda: uma carta de Morize ao deputado pelo Ceará Ildefonso Albano, solicitando seu apoio e informando que, no eclipse de 1912, o Presidente da República tinha pedido verba ao Congresso para a Comissão do Eclipse; a resposta desse deputado anunciando a aprovação da

verba pela Comissão de Finanças; a correspondência da Câmara dos Deputados do Rio de Janeiro sobre a liberação do crédito e uma carta de Morize ao presidente do Tribunal de Contas informando a não autoria de uma publicação acusando demora no despacho de papeis da Comissão do Eclipse.

Segundo os papéis do eclipse de 1912, também preservados no Acervo do MAST, o Ministério da Agricultura teria arcado com as despesas de transporte de pessoas e equipamentos no território brasileiro e as verbas teriam saído sem que Morize tivesse que insistir ou reclamar de atrasos. Mas a situação financeira em 1919 tinha se deteriorado, e muito. No eclipse de 1912 o Presidente da República, Hermes da Fonseca, chegou a ir para Passa-Quatro com a esposa na tentativa de observar o eclipse. Já no de 1919 o Presidente da República era Epitácio Pessoa, eleito há menos de algumas semanas antes do eclipse para solucionar um longo problema de sucessão, em meio a greves e crises sociais.

SOBRAL: UMA PEQUENA GRANDE CIDADE NO SERTÃO

A foto tirada do alto de 1919 mostra uma cidade pequena, mas com boas edificações (figura 4). Na segunda metade do século 18, Sobral tinha se desenvolvido na onda da charqueada (produção e comercialização da carne seca). Depois firmou-se como intermediadora de produtos agrícolas produzidos no noroeste do estado para o resto do Ceará e o Piauí. As secas de 1877 e 1879 motivaram a construção da Estrada de Ferro de Sobral para ligar a cidade ao porto de Camocim. A estação de trem foi inaugurada em 1882, ajudando a firmar Sobral como centro urbano e comercial. Ao mesmo tempo, todo o estado do Ceará também se desenvolvia, impulsionado pela implantação da navegação a vapor e das estradas de ferro.

Com a ascensão da economia do algodão, algumas décadas antes do eclipse, a industrialização chegou a Sobral com a instalação de uma indústria de beneficiamento (Companhia Industrial de Algodão e Óleo) e de uma tecelagem (Fábrica de Tecidos de Sobral). Esta última, fundada em 1895, funcionou até 2005 e membros da família Saboya, que colaboraram hospedando os cientistas no eclipse de 1919, foram sócios da mesma. Na época do eclipse a cidade de Sobral – conhecida como “a Princesa do Norte” –, ganhava iluminação a gás.

Outros indicativos de prosperidade na época foram a remodelação do mercado municipal, que ganhou uma bela e sólida estrutura de ferro fabricada no Rio de Janeiro e a criação de um bispado, tendo à frente um filho da terra. Também cresceu a frequência dos sobralenses

Figura 4. Sobral vista do alto em 1919. Crédito: *Carnegie Institution for Science.*



em eventos no Teatro São João, onde também funcionava um cinema; no *Club* dos Democratas e no Grêmio Recreativo Sobralense, que promoviam bailes dançantes e carnavalescos; além do *Jockey Club*, onde havia corridas e apostas – que durante o eclipse foram suspensas para o espaço funcionar como uma das praças de observação.

Mas Sobral fica no escaldante sertão nordestino. A seca era um poderoso complicador natural, político e social. Forçava migrações frequentes do campo para a cidade e muitas pessoas decidiam deixar o próprio estado para regiões mais favoráveis da Amazônia e do sul do país. Para um problema tão grave, que abrangia todo o nordeste, quase não havia outra alternativa senão pedir providências ao governo federal para a calamitosa situação dos famintos.

Programas governamentais haviam sido implantados desde o final da monarquia, no entanto nunca tinham dado uma solução minimamente satisfatória ao problema. Pelo contrário, deram lugar a práticas abusivas de chefes políticos locais e à desigualdade entre as oligarquias e o povo em geral. Embora 1917 tivesse sido um ano de cheia, na ocasião do eclipse, em 1919, a população de Sobral mantinha bem viva na memória as adversidades causadas pela grande seca de 1915, sendo que anos depois a situação iria se agravar ainda mais, com o corte de recursos financeiros. Essa seca provocou o êxodo da população. Ao mesmo tempo, o governo estadual criava áreas de confinamento, que eram conhecidos como “currais do governo”, para impedir que os retirantes fossem para as grandes cidades. Mesmo assim, na época do eclipse um membro da expedição americana fotografou refugiados rurais que vinham pedir comida nas casas de Sobral (figura 5).

Figura 5. Refugiados rurais mendigando na época do eclipse.
Crédito: Carnegie Institution for Science.
Fonte: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-48296017>



O mesmo cientista americano também fotografou uma pessoa coletando um pouco da escassa água numa cacimba cavada no leito seco do intermitente rio Acaraú (figura 6). A higiene pública era tão precária que animais tinham acesso e até pessoas portadoras de doença se banhavam nesses locais.

MORIZE ANFITRIÃO

Visando êxito na observação do eclipse, cabia a Morize avaliar se as condições meteorológicas em Sobral eram favoráveis. Essa tarefa é ingrata porque envolve uma componente lotérica, uma vez que não há correlação forte entre os parâmetros climatológicos e uma situação meteorológica favorável num determinado local, nos poucos minutos da totalidade do eclipse, numa limitada porção do céu ao redor do Sol. Mesmo assim, o mais racional era escolher os locais promissores com base em dados climatológicos, quando esses existissem.

Sabia-se que em Sobral o mês de maio encerrava a estação das chuvas, durante a qual o céu era geralmente nublado. Mas a estação seca, ventosa e com céu parcialmente nublado só se firmava em outubro. Esses dados climatológicos não condenavam a cidade ao descarte, mas também não eram de todo promissores. A sorte foi lançada e, de fato, chegou a chover na manhã do eclipse. Por alguns momentos, Morize chegou a temer que o fracasso de 1912 se repetisse.

Com base nas informações coletadas, Morize redigiu o documento “*Informations sur la zone bresilienne de l’Éclipse Totale du 28/29 Mai 1919*”

Figura 6. Coletando água em cacimba do leito seco do Acaraú.
Crédito: *Carnegie Institution for Science*.
Fonte: <https://www.bbc.com/portuguese/brasil-48296017>



em quatro páginas datilografadas. A cópia preservada no Acervo do MAST, além de correções feitas à mão, tem num canto a anotação para serem feitas cinco cópias. Aparentemente ela teria dado lugar a uma versão final em francês, de três páginas (figuras 7, 8 e 9), também preservada no Acervo do MAST, que teria sido distribuída. O francês pode parecer estranho hoje, mas entre os papéis da época não foi incomum encontrar até mesmo cartas de ingleses escritas em francês. No documento final fica clara a preferência de Morize por Sobral, sob o argumento de que oferecia boa logística para o transporte das pessoas e dos equipamentos por estrada de ferro ao porto de Camocim e boa conexão marítima a vapor dessa cidade com Recife ou Belém, onde os transatlânticos poderiam chegar. Sobral oferecia ainda boas condições de hospedagem, além de profissionais como pedreiros, carpinteiros e mecânicos.

Em relação às condições meteorológicas, Morize argumentou que em Sobral havia anos normais (em que chovia na estação chuvosa) e anos secos. Nestes últimos o céu costumava permanecer nublado mesmo que não caísse uma gota d'água. Já nos primeiros poderia chover na época do eclipse (fim da estação chuvosa), mas as chuvas normalmente ocorreriam na parte da tarde, de modo que havia boas chances de observação do eclipse, que seria de manhã. Acrescentava que o calor era intenso, mas geralmente havia uma brisa que o amenizava. No documento, Morize não omitiu Teresina como outro possível posto de observação, contudo advertiu que lá o calor era insuportável, que grassava a febre amarela e que o acesso era difícil: para chegar pelo rio Parnaíba a duração da viagem variava de dois a 20 dias. Já para chegar de trem, era preciso ir de São Luís a Caxias, no Maranhão, por via fluvial e daí seguir de trem para Teresina.

Figuras 7, 8 e 9.
"Carta de Morize de 3 páginas, informando condições de observação do eclipse. Acompanhava um mapa da região com uma tabela de dados. Fonte: Arquivos "sobral d2_0096", "sobral d2_0097" e "sobral d2_0098" do Acervo MAST."

Monsieur et Honoré Confrère,

J'ai l'honneur de vous faire parvenir quelques informations au sujet de la zone de l'éclipse solaire du 28/29 Mai 1919.

C'est d'abord la zone de la totalité, dessinée sur une carte représentant ce qu'on connaît de plus exact sur la géographie de la région. Ayant en vue d'importance de la position géographique des points principaux, plusieurs ont été soigneusement déterminés récemment par M. Benjamin de Oliveira, Ingénieur des Télégraphes, qui s'était auparavant exercé à l'Observatoire de Rio. Les longitudes ont été déterminées télégraphiquement pour toutes les stations dont les noms sont soulignés sur le tableau des observations pluviométriques. Les autres positions ne sont qu'approchées, et proviennent des cartes et des reconnaissances exécutées par l'Inspection des Travaux contre la Sécheresse.

Suivant ce tableau, on voit facilement la manière dont la pluie se distribue pendant l'année. A chaque mois, on trouve la précipitation exprimée en mm. et le nombre de jours de pluie. Les valeurs se repartissent très différemment, suivant que l'année est normale ou que survient une sécheresse plus ou moins désastreuse. Normalement l'année se divise en deux périodes, l'une pluvieuse, qui va de décembre à juin et l'autre sèche, pendant le reste de l'année. La date de l'éclipse tombe donc à la fin de la saison humide, et si l'année est normale la probabilité de la pluie sera grande; mais comme l'éclipse aura lieu dans la matinée et que les averses se produisent principalement dans l'après midi, il est très possible d'avoir même alors, des conditions d'observation satisfaisantes. Si, par contre l'année est sèche, la nébulosité peut être assez grande sans qu'il

tombe une goutte d'eau.

L'année 1915 a été caractérisée par une forte sécheresse, et le tableau manifeste nettement la diminution du nombre des jours de pluie et de la hauteur de cette dernière.

Je dois ajouter que quelle que soit l'époque, toute la région est parfaitement salubre, bien que la température, peu variable, y monte, en moyenne, à 25 ou 26° C., mais la brise ~~presque-constant~~ qui souffle presque constamment empêche qu'elle ne devienne oppressive.

Suivant les informations rapportées par M. Benjamin de Oliveira, de son voyage, la seule région de la zone de l'éclipse où l'on puisse trouver des ressources satisfaisantes est celle du chemin de fer de Sobral. Le point de départ est Camocim, où on peut arriver de Recife ou de Pará, par les vapeurs de la Compagnie Maranhense. Ce sont de petits vapeurs de 400 à 500 tonnes, qui font un voyage mensuel dans chaque sens, et offrent un confort relatif. On peut également disposer de "tramps" au nombre de deux ou trois par mois, qui transportent du bétail de Camocim à Belem (Pará), mais qui sont dépourvus de toute commodité. Il existe aussi des embarcations à voiles de 50 à 100 tonnes qui circulent fréquemment entre Pernambuco e Tutoya (Maranhão) et qui sont souvent utilisées par les habitants pour voyager du sud au nord, à cause de la rapidité des parcours dans ce sens, produite par la direction constante des alisés qui soufflent dans la même direction.

Il existe à Camocim des appontements où les vapeurs accostent et qui permettent le transbordement direct des colis dans les wagons du chemin de fer. Sobral se trouve à 130 km. de Camocim, et, comme importance, constitue la seconde ville de l'état du Ceará. Le voyage par voie ferrée se fait en 5 heures. On y trouve, ainsi qu'à Camocim, des hôtels supportables, mais où les lits sont substitués par des hamacs. On obtiendra dans ces deux villes les ouvriers nécessaires. On peut compter, en plus, sur la bonne volonté de la compagnie de chemin de fer, qui possède à Camocim des ateliers assez bien montés.

On trouve, à peu près partout, de la viande boucanée, et dans les

villes, de la viande fraîche et du pain. On peut se procurer abondamment la long du littoral, d'excellent poisson. Il existe partout des haricots et des céréales, mais on ne doit pas compter sur des légumes frais.

La ligne centrale de d'éclipse coupe le fleuve Parnahyba ainsi que le chemin de fer qui relie Caxias (Maranhão) e Theresina (Piahy). Cette dernière ville, capitale de l'état, se trouve sur le Parnahyba, à peu de distance de la ligne centrale, et on pourrait être tenté de suivre le fleuve pour y arriver. Le voyage se fait sur des vapeurs à fond plat, et leur durée est indéterminée, de 2 à 20 jours, à ce que rapporte M. B. de Oliveira, suivant l'étiage. De plus, la chaleur est très forte et la région n'est pas parfaitement salubre. Le voyage peut être fait un peu plus rapidement, mais dans des conditions analogues, en partant de S. Luis (Maranhão) et en remontant le fleuve Itapicuru jusqu'à Caxias.

Si d'autres informations pouvaient vous présenter quelque intérêt, je serais très satisfait de pouvoir vous les fournir, et, d'une façon générale, j'ai l'honneur d'être à votre entière disposition pour tout ce qui sera à ma portée.

Veuillez, Monsieur et Honoré Confrère, accepter l'hommage de ma considération la plus distinguée et l'assurance de mon dévouement.

Directeur.

Entre fevereiro e março de 1918 Morize distribuiu esse documento para Perrine; para o conhecido Camille Flammarion (1842-1925), secretário-geral da RAS¹; para Edward C. Pickering (1846-1919), diretor do *Harvard College*; para o astrônomo espanhol Carlos Puente (1855-1925), de Madri; e para o astrônomo amador francês conde Aymar Eugène de La Baume Pluvinel (1860-1938), então presidente da *Société Astronomique de France* – que logo respondeu lamentando que provavelmente ninguém viria ao Brasil para ver o eclipse.

Ainda um mês antes do eclipse, Morize e Domingos Fernandes da Costa (1882–1956), também do ON, visitaram Sobral para providenciar as acomodações para os membros das expedições, que ficariam hospedados não em hotéis ou pensões, mas em residências cedidas por particulares. Nessa visita, Morize deixou com o prefeito, José Jacome de Oliveira, um mapa do eclipse, que ficaria para consulta geral na prefeitura, e dois telescópios com os quais a população poderia acompanhar o eclipse numa praça da cidade. De passagem por Camocim, Morize publicou no jornal local um artigo de divulgação sobre o Sol, eclipses e sobre os estudos que seriam feitos em Sobral. Também procurou induzir na população um comportamento adequado, que não prejudicasse os trabalhos das expedições.

Quando do eclipse, Morize levou vários exemplares do Anuário do Observatório, folhetos de divulgação do eclipse, cópias de conferência

1 Arthur Eddington foi secretário da RAS de 1912 a 1916, portanto em 1918 não seria mais o secretário dessa entidade.

Figura 10. Estação meteorológica sendo entregue aos cuidados do Prefeito de Sobral, à direita. À esquerda, o meteorologista Luiz Rodriguez. À direita aparecem as casas em que as expedições estrangeiras ficaram hospedadas. Fonte: <https://daed.on.br/sobral/>



proferida por ele sobre o eclipse na Sociedade Brasileira de Ciências para distribuir às autoridades e pessoas interessadas.

Observações meteorológicas também foram feitas pela expedição brasileira como subsídio para todas as expedições. Depois do eclipse, os aparelhos meteorológicos foram deixados para constituírem uma “estação de 2ª classe” da rede nacional do ON e foram entregues ao prefeito da cidade, José Jacome de Oliveira (figura 10).

Como responsável pela assistência às expedições estrangeiras e supervisor da Comissão Brasileira em Sobral, coube a Morize ainda atender a imprensa, manter o contato com as autoridades locais, solucio-

nar emergências, improvisar pequenos consertos, mediar disputas e mal-entendidos. Entre as atividades, designou pessoas que pudessem atuar como intérpretes dos estrangeiros: o engenheiro Leocadio Araújo, da Secretaria Estadual da Agricultura, foi intérprete dos ingleses; John Sandford, um norte-americano radicado em Sobral, e H. de Lima, de Fortaleza, atenderam os americanos.

O fato de os estrangeiros, em geral, dizerem ter sido bem atendidos pelos agentes da alfândega para entrarem com os seus equipamentos, indica também que Morize tomou previamente as providências junto às autoridades locais. É certo que ele contatou os diretores de estradas de ferro e companhias de navegação para facilitar o transporte de pessoas e equipamentos.

Até um automóvel foi obtido pelo Governo no Rio de Janeiro e o motorista foi cedido pela Casa Studebaker, a pedido do Ministro da Cultura. Esse carro foi o primeiro a circular em Sobral e serviu aos membros das expedições, mas acabou rendendo aborrecimentos. Além de apresentar problemas mecânicos (como vazamento de água por furo na mangueira), os passeios na companhia dos cientistas passaram a ser disputados como moeda de troca por favores prestados. Além disso, o motorista era mal-humorado, prestava o serviço de má vontade, sem cortesia e corria desabaladamente, causando medo nos passageiros e reclamações justas que chegavam a Morize.

Os diários relatam ainda sonos mal dormidos, por causa dos mosquitos e do excessivo calor, e frequentes indisposições, tanto que o Dr. Jacome, prefeito que também era médico, foi chamado diversas vezes para atender emergências.

DA RELATIVIDADE RESTRITA À RELATIVIDADE GERAL

Para entendermos a importância do eclipse solar de 1919 convém acompanhar a evolução dos estudos de Einstein. O físico alemão lançou sua *Teoria da Relatividade Restrita* em 1905. Postulando a constância da velocidade da luz no vácuo (cerca de 300 mil km/s), e que esse valor não se alterava a despeito do movimento da fonte de luz ou do observador, ele formulou essa teoria que descreve os fenômenos físicos com as mesmas equações, mesmo que observados por diferentes observadores em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme. Esses observadores são chamados inerciais e se caracterizam por não estarem submetidos à ação de qualquer força que altere a velocidade ou a direção do movimento. Disso resultou uma teoria que predizia a variação da passagem do tempo e do tamanho das coisas em função do movimento do observador, sendo a dilatação do tempo e a contração do espaço tanto maior quanto mais a velocidade se aproximasse da velocidade da luz. O espaço 3D e o tempo 1D, agora relativos ao movimento do observador, foram fundidos numa única entidade geométrica 4D chamada espaço-tempo, este sim, absoluto.

Em 1907, porém, Einstein foi convidado a escrever um artigo de revisão sobre a Relatividade Restrita, que foi publicado no ano seguinte. A essas alturas ele sentia insatisfação pelo fato de sua teoria se aplicar somente a observadores inerciais. Sentiu-se então desafiado a dar maior generalidade à Relatividade Restrita. Fundamentalmente ele de-

veria ajustar a clássica Teoria da Gravitação de Newton à sua nova concepção de espaço-tempo, criando assim a *Teoria da Relatividade Geral*.

Ao publicar o artigo de revisão, Einstein já tinha percebido que poderia introduzir o movimento acelerado na Relatividade Restrita, fazendo uso do Princípio da Equivalência que ele mesmo havia estabelecido. Segundo esse Princípio, um observador numa cabine sem janelas não seria capaz de distinguir experimentalmente se estava, por exemplo, na superfície da Terra sob a ação de um campo gravitacional, ou numa cabine propelida no espaço por um foguete com aceleração equivalente à da gravidade na superfície da Terra. Assim, no artigo de revisão Einstein adiantou efeitos da gravidade que poderiam ser observados numa cabine acelerada no espaço por um foguete: (a) a dilatação do tempo no fundo da cabine; (b) um raio de luz que seria horizontal na cabine inercial, sofreria encurvamento para baixo ou queda como os demais objetos e (c) não só a direção da luz mudava, como também sua celeridade, sendo esta menor onde a gravidade é mais intensa (a invariância da velocidade da luz é postulada para sistemas inerciais).

Com base em (a) Einstein predisse corretamente o deslocamento de linhas espectrais para o vermelho²; com base em (b) predisse a deflexão da luz, porém, ainda de forma incompleta porque o espaço-tem-

2 Estrelas exibem linhas de absorção em seus espectros e a Relatividade Geral predisse que essas linhas, quando observadas da Terra, estariam deslocadas para o vermelho, tanto mais quanto mais intenso fosse o campo gravitacional na superfície dessas estrelas, por exemplo, anãs brancas ou estrelas de nêutrons que são altamente densas.

po ainda era o da Relatividade Restrita, portanto plano; ainda seria preciso encurvar o espaço-tempo. Nem teria ainda ocorrido a Einstein que a deflexão da luz pudesse ser verificada observacionalmente num eclipse total do Sol. O efeito (c) já dava uma pista de que o espaço-tempo deveria ser encurvado, pois a determinação da velocidade depende da medição do espaço e do tempo, portanto da régua e do relógio utilizados, sendo que estes são afetados pela curvatura do espaço-tempo. A introdução dessa curvatura era o passo crucial para completar a formulação da Teoria da Relatividade Geral. A geometria clássica era a de Euclides, do espaço plano. Mas geometrias curvas ou não euclidianas já existiam desde 1830.

Em 1911, quando lecionou em Praga, Einstein reconsiderou seu artigo de 1908 e escreveu um novo. Mas não foi ainda dessa vez que introduziu a curvatura do espaço-tempo. Predisse então uma deflexão da luz junto ao bordo solar de 0,83", valor esse ainda equivocado. Ela foi chamada "predição de Praga". Numericamente era equivalente ao valor que se podia obter com base na Teoria da Gravitação de Newton, supondo que a luz era constituída de partículas com massa.

Dessa vez Einstein convocou os astrônomos a testarem sua predição num eclipse total do Sol. A reação da comunidade astronômica, no entanto, foi de quase completo silêncio, exceto por conta do jovem alemão Erwin-Finley Freundlich (1885-1964), então astrônomo-assistente do Observatório de Berlim, que imediatamente se ofereceu para colaborar com Einstein. Inicialmente, Freundlich cogitou examinar fotografias de eclipses passados. Em questão de alguns dias, escreveu uma carta para o já citado Perrine, diretor do Observatório de Córdoba.

Apesar do desencontro, pois à chegada da carta de Freundlich a Córdoba, Perrine tinha viajado para participar de uma conferência internacional em Paris (entre 23 e 26 de outubro de 1911), Freundlich e Perrine acabaram se encontrando por poucas horas em Berlim. Isso porque, após a conferência de Paris, Perrine fez uma viagem de trem para o Observatório de Pulkovo em São Petersburgo. Nessa viagem ele fez uma escala em Berlim, o que propiciou o contato com Freundlich. Este consultou Perrine sobre a possibilidade de utilizar as fotografias obtidas por ele nas expedições para eclipses de que participara em nome do Observatório de Lick, à procura de um planeta entre Mercúrio e o Sol. Esse hipotético planeta intramercuriano foi proposto pelo astrônomo francês Urbain Le Verrier (1811-1877) na tentativa de explicar a *anomalia da precessão de Mercúrio*³ sem abandonar a teoria gravitacional de Newton. Le Verrier chegou a conclamar os astrônomos a observarem o eclipse de 1860. Mas a anomalia seria explicada em 1915 pela Relatividade Geral.

A consulta de Freundlich fazia sentido, pois Perrine, junto com Campbell, tinha observado o eclipse de 29 de maio de 1900 no estado

3 A órbita elíptica de Mercúrio não permanece estática, mas gira (precessiona) ao redor do Sol, de forma que o periélio (ponto da órbita de Mercúrio mais próximo ao Sol), a cada volta do planeta ao redor do Sol, avança no mesmo sentido do movimento do planeta. Esse fenômeno já era previsto pela Teoria Gravitacional de Newton mas, mesmo levando em conta, além do Sol, os demais corpos do Sistema Solar, a precessão observada continuava teimosamente apresentando um excesso de 43"/século, discrepância essa que constituía uma anomalia já notada desde 1859. Ela ocorre também em outros planetas, mas em Mercúrio é mais facilmente observável.

americano da Geórgia utilizando a câmara de 40 pés do Observatório de Lick. O campo fotografado era rico de estrelas, excelente em princípio para a verificação da deflexão da luz, sendo quase o mesmo do futuro eclipse de 1919. Mas a resposta imediata de Perrine foi negativa, alegando que, nas imagens obtidas, o Sol não se encontrava no centro das placas. Mesmo assim, Freundlich solicitou as fotografias diretamente a Campbell e as analisou, mas não obteve resultados. Muito provavelmente nesse encontro Freundlich teria pedido para Perrine obter fotografias durante o eclipse que ocorreria no Brasil em 1912, objetivando detectar a deflexão da luz pelo Sol.

De fato, vimos que Perrine veio fazer essa observação no Brasil, em Cristina, quando foi prejudicado pela chuva torrencial. Apesar do fracasso, o eclipse de 1912 em Minas Gerais merece ficar registrado como aquele em que, pela primeira vez, houve uma real tentativa de confirmar a deflexão da luz, embora ainda com valor equivocados. Essa tentativa foi anterior à de Freundlich na Rússia, apontada muitas vezes como a primeira.

A nova tentativa começou a ser esboçada em março de 1914, quando Freundlich chamou a atenção dos colegas astrônomos para a oportunidade que se ofereceria no eclipse solar de 21 de agosto daquele ano, na Crimeia (Rússia), para a confirmação da deflexão. No entanto, a possibilidade não suscitou o interesse dos colegas. Freundlich nem obteve apoio financeiro de seu superior imediato, mas obteve o apoio de Einstein para angariar fundos privados, já que não havia possibilidade de fundos oficiais. Nesse ano, a convite do físico teórico alemão Max Planck (1858-1947) – pai da Física Quântica e Prêmio Nobel de

Física de 1918 –, Einstein havia se mudado para Berlim, onde seria o primeiro diretor do Instituto Kaiser Wilhelm para a Física. Ele permaneceria em Berlim até 1933.

Tendo levantado recursos para observar o eclipse de 1914 na Rússia, Freundlich convidou Perrine e Campbell, no que foi atendido por ambos. Com itens emprestados por Perrine, Freundlich montou quatro telescópios e conseguiu organizar uma expedição para Feodósia, na Crimeia, às margens do Mar Negro. Os mesmos equipamentos levados para Cristina também foram despachados por Perrine para Berlim. A expedição do Observatório de Berlim deveria se encontrar com a da Argentina em Feodósia, para juntas observarem o eclipse. Mas foi aí que eclodiu a I Guerra Mundial. Por ser cidadão alemão e tendo a Alemanha recém-declarado guerra à Rússia, Freundlich foi considerado potencial espião pelos russos, que o detiveram com os seus assistentes como prisioneiros de guerra, e ainda confiscaram seus instrumentos. Obviamente Freundlich não pôde fazer a observação. Já a equipe argentina conseguiu chegar ao posto observacional, mas tirou apenas poucas fotografias entre nuvens, que nem eram para confirmar o *efeito Einstein*.

Campbell, por sua vez, acompanhado de Heber D. Curtis⁴ (1872-1942) também do Observatório de Lick, se deslocou para as proxi-

4 Em 1920 Curtis participou com Harlow Shapley (1885-1972), do Observatório de Mount Wilson, do famoso “Grande Debate” na *National Academy of Sciences*, em Washington, sobre o papel das galáxias espirais (como a Via Láctea) na constituição do Universo. Para Shapley havia apenas uma galáxia no Universo e dentro dela estavam todas as “nebulosas espirais” que ele supunha erroneamente serem gasosas. Para Curtis essas nebulosas eram outras galáxias, externas à nossa.

midades de Kiev, capital da Ucrânia. Sendo da América neutra, não foi impedido de seguir com a observação, que não pôde ser feita por causa do mau tempo.

ARREMATANDO A RELATIVIDADE GERAL

Após iniciar a construção da sua Teoria da Relatividade Geral, Einstein seguiu aperfeiçoando seus estudos. Podemos dizer que a deflexão gravitacional da luz foi o fio condutor desse desenvolvimento.

Em 1911 Einstein havia constatado que a velocidade da luz variava localmente de acordo com a intensidade da gravidade. Segundo o Princípio de Fermat, o caminho de um raio de luz entre dois pontos é aquele que pode ser percorrido no menor tempo. E o trajeto mais curto entre dois pontos do espaço é tecnicamente chamado *geodésica*. Se o espaço é euclidiano (ou plano), por definição ele obedece aos postulados da Geometria de Euclides e toda geodésica é um segmento de reta. Mas se o espaço for não euclidiano, ou curvo, a geodésica é curva. A deflexão da luz seria então, não devida à “ação a distância” de uma força, como ensinara Newton, mas porque o espaço-tempo se tornava curvo e a curvatura do espaço-tempo era devida à presença de matéria. Agora a teoria de Einstein deveria incorporar a ideia de que a presença da matéria encurvava o espaço-tempo, explicação essa que exigia um formalismo matemático mais poderoso que a álgebra.

Aconselhado já em 1912 pelo matemático Marcel Grossmann (1878-1936) – seu ex-colega e amigo dos tempos de Zurique – e de-

pois de relutar por muitos anos, Einstein aceitou ser introduzido ao *Cálculo Tensorial*, ferramenta matemática indispensável para o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral. No fundo, Einstein teve que “engolir” que o espaço-tempo plano de Minkowski⁵, uma geometrização do espaço-tempo algébrico de 4D do qual havia desdenhado, era o que devia ser deformado ou encurvado para expressar a presença da matéria e energia, dando lugar ao surgimento da gravidade. Da colaboração entre Einstein e Grossmann resultou, em 1913, um primeiro artigo sobre a Relatividade Geral, com o raciocínio físico no qual a teoria era baseada (Parte I) escrito por Einstein e a matemática tensorial utilizada (Parte II), por Grossmann. Einstein chegou a apresentar dez equações não-lineares acopladas, que ele considerou corretas. Elas eram complicadas e nem sequer tinham sido interpretadas geometricamente. Com a publicação desse trabalho, feita com certo alarde, Einstein considerou que a maior parte da sua teoria estava pronta, faltando apenas alguns detalhes a serem elucidados. Mas esse sentimento durou pouco. Logo ele descobriu um erro fatal, pois suas equações não reproduziam a teoria de Newton, como deveria, na situação limite em que o campo gravitacional fosse fraco e estático. Foi em Berlim, já trabalhando na Academia de Ciências da Prússia, que ele viveu um

5 Interessando-se pela Relatividade Restrita desenvolvida por seu ex-aluno na Politécnica de Zurique, em 1908 o matemático alemão Hermann Minkowski (1864-1909) desenvolveu o espaço-tempo plano que leva o seu nome. Mas ele detestava o aparente desinteresse de Einstein por suas aulas, tanto que o apelidou “cão vadio”. Vemos que a antipatia era recíproca.

“inferno astral”: além de ter que corrigir o erro, estava sofrendo com a separação da esposa, que havia levado os filhos com ela para Zurique, e a I Guerra Mundial havia estourado. No verão de 1915, Einstein tinha ministrado uma série de seis conferências sobre a Relatividade Geral na Universidade de Göttingen, onde estava o brilhante matemático alemão David Hilbert (1862-1943). Tendo este tomado conhecimento e se interessado pela Relatividade Geral, ele poderia formulá-la de forma correta e elegante antes do próprio Einstein.

No auge da aflição, Einstein percebeu que havia descrito sua teoria num sistema de coordenadas muito particular, mas que deveria descrever num sistema mais genérico. Isso porque na Relatividade Geral as leis da Física deveriam valer igualmente para todos os sistemas de coordenadas, fossem eles inerciais ou acelerados, o que tecnicamente equivale a dizer que a Relatividade deveria obedecer ao Princípio da Covariância.

Novembro de 1915 foi o mês mais trabalhoso e excitante da vida de Einstein. Ele enviou diversos boletins para a Academia Prussiana de Ciências sobre a reformulação de sua teoria, sendo que a cada semana enviava um novo, corrigindo os erros e preenchendo as lacunas dos boletins anteriores. O primeiro boletim foi publicado em 6 de novembro de 1915, como se fosse o último. Mas no dia 11 foi publicada uma correção e no dia 18 mais uma. A nova teoria explicava corretamente o excesso anômalo de 43”/século na precessão do periélio de Mercúrio e que a deflexão da luz pelo Sol era o dobro da que ele previra anteriormente (os cálculos ainda tinham sido feitos com uma solução aproximada, não exata). Agora a deflexão da trajetória da luz era vista como encurvamen-

to do espaço-tempo. A partir do bordo do disco solar, o valor da deflexão decrescia com o inverso da distância ao centro de massa do Sol.

Na comunicação feita no dia 18, Einstein afirmava ainda que a deflexão da luz pelo Sol era de 1,7" (1,74" segundo cálculos mais precisos), o dobro do valor anunciado em 1911. Agora a maior factibilidade do teste da predição desencadeou uma sucessão de acontecimentos que culminariam no anúncio da confirmação da deflexão gravitacional da luz e da validade da Relatividade Geral. A deflexão não era mais pela ação a distância de uma força, mas porque a luz, com velocidade constante, percorre *geodésicas nulas*⁶ num espaço-tempo encurvado pela presença de matéria.

Finalmente, no dia 25 apareceram as duas equações de campo da nova teoria na forma correta. Agora, para gravidade fraca e velocidades muito menores que a velocidade da luz, as equações de campo se reduziam à conhecida lei da Gravitação Universal de Newton. A correção para a covariância dependia apenas de retoques finais. Essas equações são as que também regem o Universo. Na verdade, elas mudaram a concepção do Universo. Antes o espaço e o tempo absolutos formavam o palco passivo dos acontecimentos. Agora o espaço-tempo rege a dinâmica do Universo ao se curvar, se dobrar e até se fechar na morte de certas estrelas, fazendo-as sumir do horizonte.

6 Geodésicas nulas porque no espaço-tempo 4D e curvo, a distância de separação entre dois eventos é nula para a luz.

EXPEDIÇÕES PARA SOBRAL

EXPEDIÇÃO BRASILEIRA

A expedição brasileira, chefiada por Morize, contava com os engenheiros Domingos da Costa e Allyrio H. de Mattos (1889-1975), assistentes do ON; o calculador⁷ Lélío I. Gama (1892-1981); o químico especialista em espectroscopia Theophilo H. Lee, do Serviço Geológico do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio; o meteorologista Luiz Rodriguez e o mecânico Arthur de Castro Almeida (figura 11). Morize, Costa e Mattos estavam acompanhados de suas esposas e cada casal levou um filho.

O grupo partiu de vapor do Rio de Janeiro no dia 25 de abril rumo a Fortaleza. Lá a expedição brasileira se encontrou com os dois membros da expedição norte-americana e todos seguiram juntos de vapor para Camocim. No dia 9 de maio seguiram para Sobral em trem da estrada de ferro Viação Cearense.

A expedição brasileira se hospedou em duas casas, uma de frente para outra, que já estavam reservadas perto da igreja do Patrocínio: os casados em uma e os solteiros em outra. A expedição norte-americana

7 Funcionários de observatórios que calculavam as efemérides astronômicas, faziam o tratamento numérico de dados observacionais fazendo cálculos em papel ou utilizando calculadoras simples, numa época em que ainda não existiam os computadores.

foi hospedada nas residências do coronel Vicente Saboya e de José Saboya de Albuquerque, onde a expedição britânica já estava hospedada. Todas as expedições tomaram as refeições na Pensão Smart.

OBJETIVO CIENTÍFICO: FÍSICA SOLAR

O número de maio/junho de 1920 da “Revista de Sciencia”, órgão da Sociedade Brasileira de Sciencias, publicou a conferência proferida por Morize naquela Sociedade, dando conta dos resultados obtidos pela expedição brasileira no eclipse de 1919: “*A forma e a disposição da corôa, assim como a indagação espectroscópica de sua composição constituíram ... os dois principais assumptos do programma da Comissão Brasileira...*”. O efeito Einstein, portanto, estava inteiramente fora do escopo da expedição.

A Física Solar, ainda sem uma teoria, era uma disciplina mais observacional e descritiva do que explanatória. Recapitulando brevemente, as manchas solares ficaram conhecidas desde Galileu (1610) com o advento do uso da luneta, mas novos conhecimentos só surgiram a partir de meados do século 19. Entre eles, que o número de manchas aumenta e diminui periodicamente em ciclos de pouco mais de 11 anos (1843); que esse *ciclo solar* é correlacionado com o ciclo de atividade geomagnética, isso é, o Sol afeta o campo magnético da Terra (1852); que as manchas perto do equador do Sol giram mais depressa do que as manchas de latitudes mais elevadas (rotação não rígida, mas diferencial do Sol) e que elas migram de altas latitudes para o equador a partir de um mínimo de atividade solar até o mínimo seguinte (1858). Em 1º de agosto de 1859 foi flagrada, na Ingla-

Figura 11. Membros da Comissão Brasileira. Da esquerda para a direita, a partir da segunda pessoa: Luiz Rodriguez, Theophilo Lee, Henrique Morize, Domingos da Costa, Allyrio de Mattos, Lélío Gama e o carpinteiro Primo Flores. Fonte: <http://www.on.br/placas/desktop/eclipse/eclipse.html>



terra, na luz visível, a primeira explosão solar (súbita e intensa emissão de radiação) e, no eclipse de 18 de julho de 1860, a primeira ejeção de matéria pela coroa solar, atividade essa causadora de *auroras polares*⁸ (1889). Por conta dessas inúmeras descobertas, a segunda metade do século 19 foi considerada a Idade de Ouro da Física Solar que, então, passava a ganhar importância. Coincidentemente, nesse mesmo período surgiram também duas grandes inovações que revolucionaram a Astronomia: a *fotografia* e a *espectroscopia*, a primeira como técnica de registro preciso e permanente, inclusive de fenômenos de curta duração ou de fraco brilho.

Em 1845 foi feita a primeira fotografia do Sol com o uso do daguerreótipo (primeiro processo fotográfico de sucesso comercial, em que a imagem ficava registrada numa placa de cobre recoberta de prata). O primeiro daguerreótipo útil de um eclipse solar foi obtido em 1851, no Observatório de Königsberg, na Prússia, hoje Kaliningrado, na Rússia. Mas foi só na virada para o século 20 que a coroa solar passou a ser fotografada em eclipses, possivelmente pela dificuldade de transporte da parafernália envolvida (telescópios, câmaras, placas fotográficas, material para revelação etc.) para lugares remotos. Assim, mesmo na segunda metade do século 19, era comum a coroa ser ainda esboçada em tempo real por desenhistas que participavam das expedições.

8 Fenômeno luminoso com belas formas e cores, observado nas regiões próximas aos polos da Terra, causado pela colisão de partículas eletricamente carregadas e altamente velozes ejetadas pelo Sol, com átomos e moléculas da alta atmosfera terrestre. Nesse fenômeno é preponderante o papel do campo magnético da Terra cujos polos não coincidem com os polos geográficos, mas encontram-se perto deles.

A outra novidade, a *espectroscopia*, produz a dispersão da luz, por exemplo, com um prisma para analisar a composição da luz dos astros⁹, determinando assim a composição química e as propriedades físicas dos astros, tais como, temperatura, pressão, movimentos ao longo da linha de visada do observador, campo magnético etc. Sem a decomposição, por muito tempo a luz tinha servido apenas para conhecermos a forma dos astros, sua posição e seus movimentos na esfera celeste.

Em 1868 foram descobertas linhas do espectro solar na região do amarelo, que não correspondiam a nenhum elemento conhecido na Terra. Esse elemento desconhecido passou a ser chamado Hélio, que só em 1895 foi isolado em laboratório. Em 1869 foi descoberta uma linha de emissão verde no espectro da coroa solar, mas decifrar a que elemento ela correspondia se tornou um problema que demandou décadas para ser resolvido. Em 1879 a linha foi erroneamente atribuída a um elemento hipotético que foi denominado Coronium.

Nesse contexto podemos entender melhor os objetivos científicos da expedição brasileira a Sobral. Com o Sol eclipsado, o que se pode ver

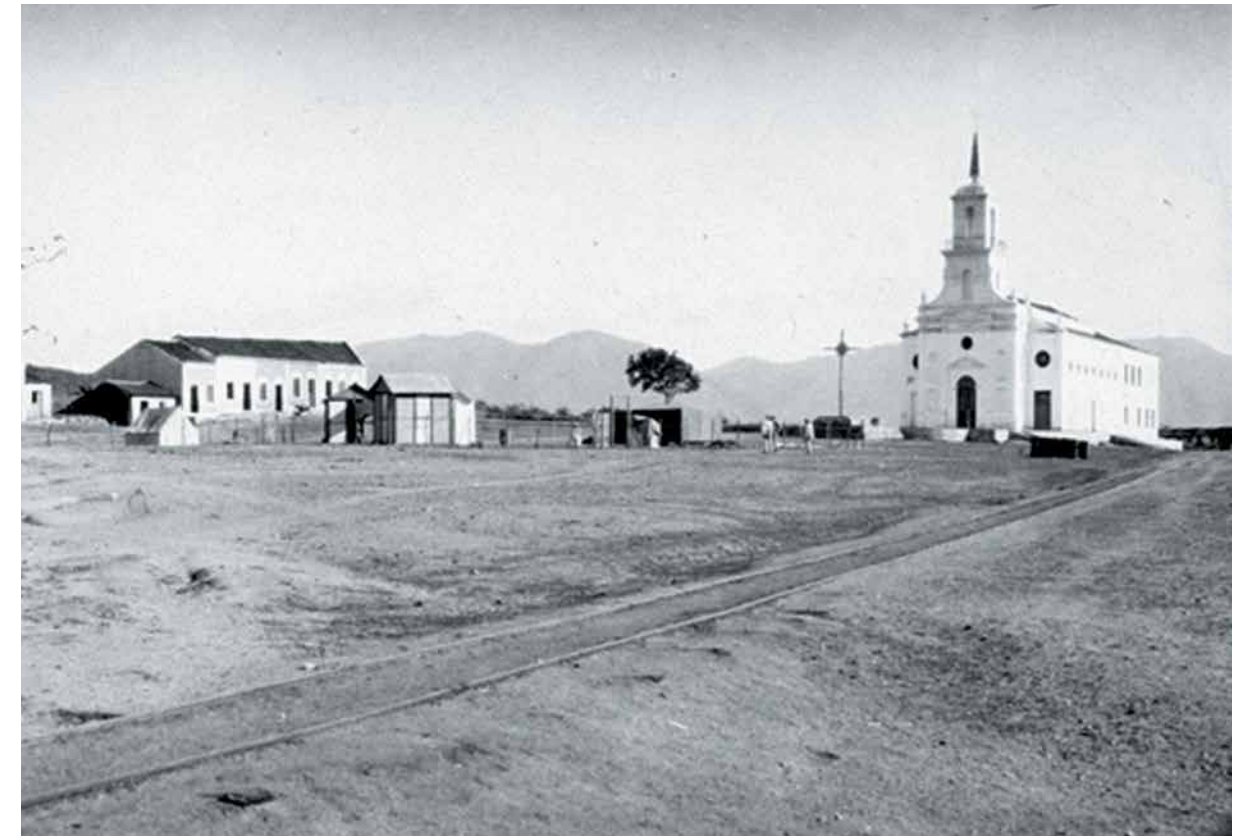
9 Desde Newton sabia-se que a luz do Sol podia ser dispersa ou decomposta nas suas várias cores (ou comprimentos de onda) por meio de um prisma. A luz decomposta é chamada espectro. Em 1802, linhas escuras (de absorção) foram descobertas no espectro da luz do Sol por um químico. Posteriormente se descobriu que, com essas linhas era possível inferir a composição química do Sol, já que linhas semelhantes eram vistas em laboratório quando a luz de um sólido incandescente (como o filamento aquecido de uma lâmpada) atravessava amostras de gases. Com o aprofundamento desses estudos, a espectroscopia revolucionou o estudo do Sol e dos astros em geral. Além da tradicional Astronomia de Posição e Mecânica Celeste, surgiu o campo fecundo da Astrofísica Estelar (constituição, estrutura interna e evolução estelar) onde o Sol era apenas uma estrela entre todas as outras.

é a atmosfera do Sol formada por sucessivas camadas mais ou menos concêntricas: de dentro para fora, *fotosfera* (camada de apenas 400 km de espessura, que emite praticamente toda luz do Sol); *cromosfera* (camada com 3 mil a 5 mil km de espessura onde a temperatura é da ordem de 4 mil a 10 mil °C, contendo estruturas inomogêneas e avermelhadas, daí o nome; a luz avermelhada é devida ao Hidrogênio); *coroa*, onde a temperatura sobe abruptamente para cerca de 2 milhões °C. Ela é extensa e sabemos hoje que não é estática; sua matéria é continuamente lançada para o espaço interplanetário através do *vento solar*.

Na época do eclipse de Sobral interessava conhecer a morfologia da coroa solar e analisar espectroscopicamente a luz da atmosfera solar. Afinal, ainda não se sabia a composição química da coroa. Tanto a morfologia da coroa como os espectros solares podiam ser registrados fotograficamente. O estudo da morfologia da coroa incluía a determinação da lei de decaimento do brilho com a distância ao centro do disco solar e as variações da forma da coroa ao longo do ciclo solar. Seria feita a espectroscopia de diversas partes da coroa com o objetivo de determinar a distribuição da linha verde atribuída ao Coronium. Com a espectroscopia da região equatorial do Sol se pretendia determinar a velocidade de rotação do Sol pelo *efeito Doppler*¹⁰.

10 O efeito Doppler consiste no aumento (ou diminuição) da frequência do som conforme a fonte sonora se aproxima (ou se afasta) de nós, mas ele ocorre em todos os fenômenos ondulatórios, inclusive com a radiação eletromagnética. Assim a variação da frequência da luz observada num espectro revela a componente da velocidade da fonte luminosa ao longo da linha de visada do observador.

Figura 12.
Acampamento
de observações
da expedição
brasileira. Fonte:
<https://daedon.br/sobral/>



ACAMPAMENTO DE OBSERVAÇÃO

No dia 10 de maio, primeiro dia após a chegada da equipe, foram feitas as observações astronômicas para a determinação da hora e do meridiano local. Entre os dias 11 e 20, na Praça do Patrocínio, em frente à igreja de mesmo nome, foi demarcada a área para os instrumentos e construídos os pilares e barracas (figura 12).

INSTRUMENTOS

Fotografia da coroa

Para fotografar a coroa os equipamentos consistiam em uma luneta fotográfica Mailhat com objetiva de 15 cm e foco de 8 m conjugada a um *celóstato*¹¹ da mesma marca. As placas fotográficas mediam 18 cm x 24 cm. Os espelhos do celóstato tinham recebido novo revestimento de prata antes da viagem (não se fez realuminização, como é usual atualmente).

Entre os equipamentos foi levada uma outra luneta, uma pequena equatorial Steinheil com objetiva dupla (dubleto) de 10cm e foco de 1,5m, que havia sido modificada pelo fabricante para o eclipse de 1912. As placas mediam 9 cm x 12 cm. Essa luneta (figura 13), que ainda faz parte do acervo instrumental do MAST, era capaz de produzir imagem do Sol em que toda a extensão da coroa podia ser bem fotografada. Ela seria utilizada para fotografar a coroa externa.

Morize se queixou da poeira levantada do solo seco pelo vento persistente, que sujava e atacava a superfície dos espelhos do celóstato e as engrenagens de relojoaria para o acompanhamento do movimento do Sol. Ele relatou problemas técnicos terríveis com a própria luneta Mailhat, só constatados em Sobral, quando se descobriu que ela nem sequer focalizava! Impressiona o fato de que esse instrumento tinha

Figura 13. Luneta Steinheil utilizada em Sobral. Fonte: Ins0012 de <http://www.on.br/placas/desktop/instrumentos/instrumentos.html>

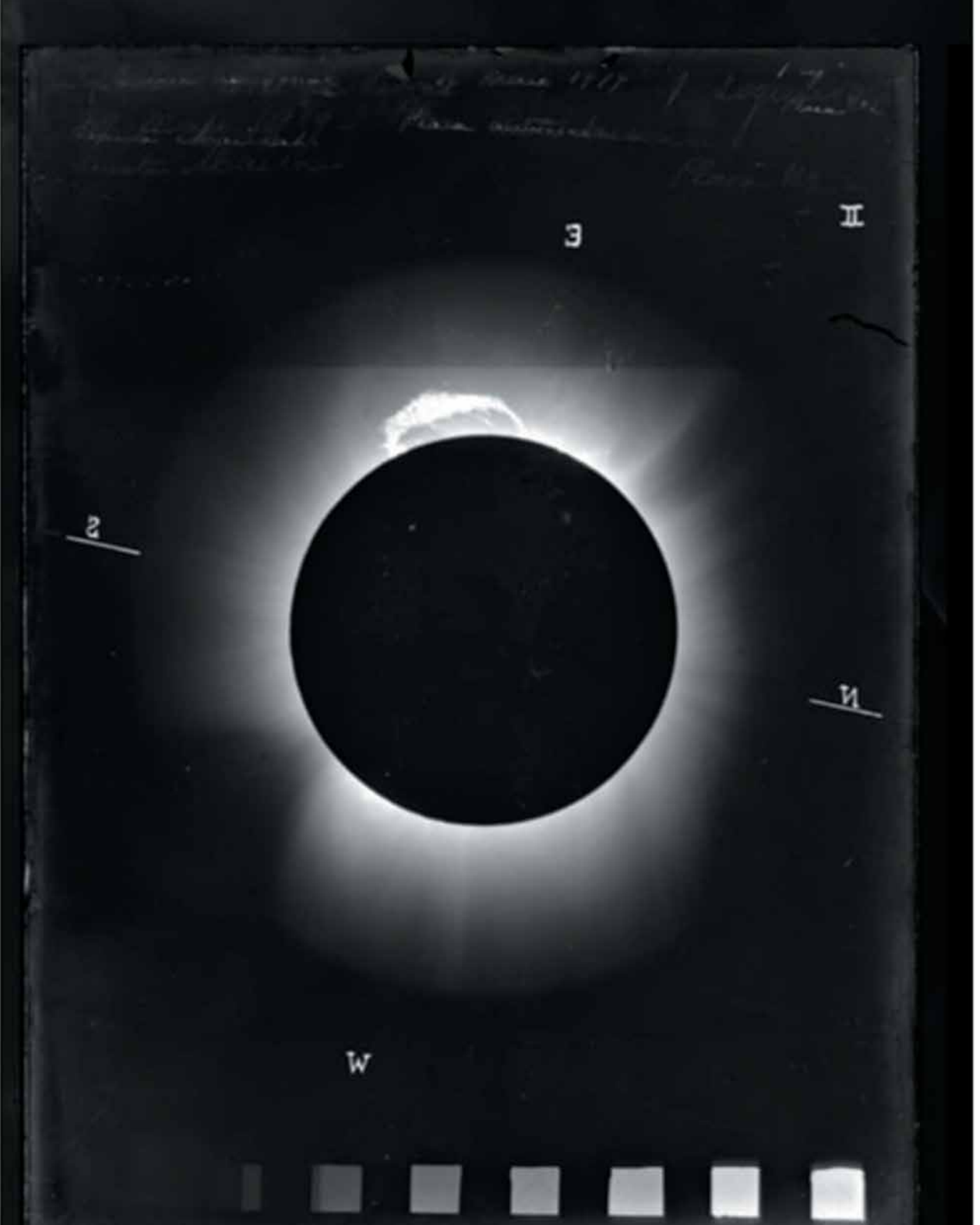


¹¹ Celóstato é um instrumento astronômico com dois espelhos planos, um gira em torno do eixo polar (eixo de rotação da Terra) à velocidade angular de 1 volta completa a cada 48 h e outro, preso a um eixo vertical, pode ser ajustado em posição fixa.

sido adquirido para o eclipse de 1912 quando acabou não sendo utilizado. Numa decisão drástica, na véspera do eclipse o tubo da luneta foi amputado em 15 centímetros. Isso possibilitou a obtenção de imagens boas do eclipse, mas o tamanho ficou inadequado para fotografar a coroa solar em toda a sua extensão. Foram feitas fotografias com tempo de exposição variando de 0,5s a 25s e obtidas seis placas da coroa interna acompanhadas de *escala fotométrica*¹². Essas placas flagraram uma extensa protuberância solar que, pela forma, foi denominada “Tamanduá” (figura 14).

12 Para registrar não apenas a forma da coroa, mas quantificar a distribuição do brilho, antes do eclipse foi impressa nas placas fotográficas uma escala fotométrica que consistia numa sequência de oito pequenos quadrados. Esses quadrados eram expostos em laboratório, um de cada vez, ao brilho de uma lâmpada incandescente padrão colocada a 10 m da placa fotográfica. O tempo de exposição para cada quadrado seguia um escalonamento calculado. Então, quando a placa com a imagem da coroa era revelada, a escala fotométrica era revelada nas mesmas condições, de modo que a opacidade de cada ponto da imagem podia ser comparada à opacidade da escala, o que permitia quantificar a distribuição do brilho na coroa. A opacidade era medida num microfotômetro, aparelho que media a quantidade de luz que atravessava a placa fotográfica (o negativo), depois de fazer incidir nela um feixe de luz com intensidade constante. Cada medição era feita numa diminuta quadrícula da placa fotográfica, de modo que a análise de uma placa requeria que essas medições fossem feitas ao longo de linhas e colunas até que a placa fosse inteiramente varrida.

Figura 14.
Protuberância
Tamanduá. Esta cópia
fotográfica mostra
a escala fotométrica.
Crédito: “Ecl0037”
de [http://www.on.br/
placas/desktop/
eclipse/eclipse.html](http://www.on.br/placas/desktop/eclipse/eclipse.html).



PERCALÇOS

O problema é que o suporte da luneta Steinheil era de treliça frágil e oscilava a qualquer vento. Além disso, o mecanismo de relojoaria (acionado por peso para que o telescópio acompanhasse o movimento diurno do Sol) era montado em uma base triangular e regulado por uma ventoinha sem nenhuma proteção. Isso fazia com que também oscilasse com qualquer aragem e permitia a entrada de areia.

E os contratempos com os instrumentos não pararam por aí. O fabricante havia feito o chassi das placas fotográficas com uma gaveta que frequentemente emperrava.

Foi preciso substituí-lo por outro, feito de aço, mas a tampa era uma lâmina fina, muito flexível, que escapava no momento da exposição da placa, quando estava escuro. Era difícil reencontrar a fenda-guia mesmo com ajuda de iluminação de uma vela, o que fazia a equipe perder muito tempo.

Ocorria ainda uma irregularidade na marcha da relojoaria, só notada depois que as fotos já estavam tiradas. Com o aumento da pressão devido à penetração da poeira, o eixo que transmitia o movimento – ele tinha duas engrenagens cônicas que, em vez de serem fixadas por cavilhas, estavam aparafusadas ao eixo – foi se soltando até que a transmissão do movimento para o eixo polar fosse interrompida. Todos esses percalços comprometeram o programa fotográfico da coroa solar. Foram obtidas seis placas, todas de curta exposição pelos problemas já apontados. Só cinco puderam ser aproveitadas. Além disso, as placas obtidas com a luneta Steinheil não tinham escala fotométrica.

Na época, o suprimento de água fresca em Sobral era precário. A revelação de placas fotográficas em água morna amolece a emulsão, que pode ter pedaços arrancados. Mas embora a água fosse um problema urbano geral, a casa que hospedou estrangeiros – residência do Cel. Vicente Saboya – tinha poço, o que era excepcional. Assim nenhuma expedição teve problema de suprimento de água em casa, nem de água fresca para processamento fotográfico, graças ao uso de jarras de barro que mantinham a temperatura da água em 24° C, mesmo sem gelo disponível. Os trabalhos fotográficos eram feitos à noite ou de madrugada. Quando necessário, se usava formol para enrijecer a emulsão e evitar deformações na imagem. As fotografias obtidas com maior sucesso pela expedição brasileira foram as da protuberância Tamandúá, não tanto as da coroa.

E O CÉU SE ABRIU

No dia 29 de maio o eclipse seria observado de manhã. Desde a chegada da expedição, as manhãs vinham sendo habitualmente claras. Mas alguns dias antes do eclipse, as manhãs começaram a ser encobertas por nuvens passageiras. Dia 25 choveu pesado, o que foi bom para abaixar a poeira. Na manhã do eclipse, uma quinta-feira, o céu amanheceu totalmente nublado e assim permaneceu. Mais tarde, através de pequena abertura entre as nuvens, foi possível ver que o primeiro contato da Lua com o Sol já tinha ocorrido. Em seguida, todo o céu se encobriu e até gotas d'água chegaram a cair. As nuvens mais pesadas

estavam exatamente sobre o Sol. Isso trouxe uma tensão em todos, mas sobretudo para Morize que deveria se lembrar do fracasso em Passa-Quatro. Houve momentos de tensão e desespero (figura 15) mas, no fim, tudo daria certo.

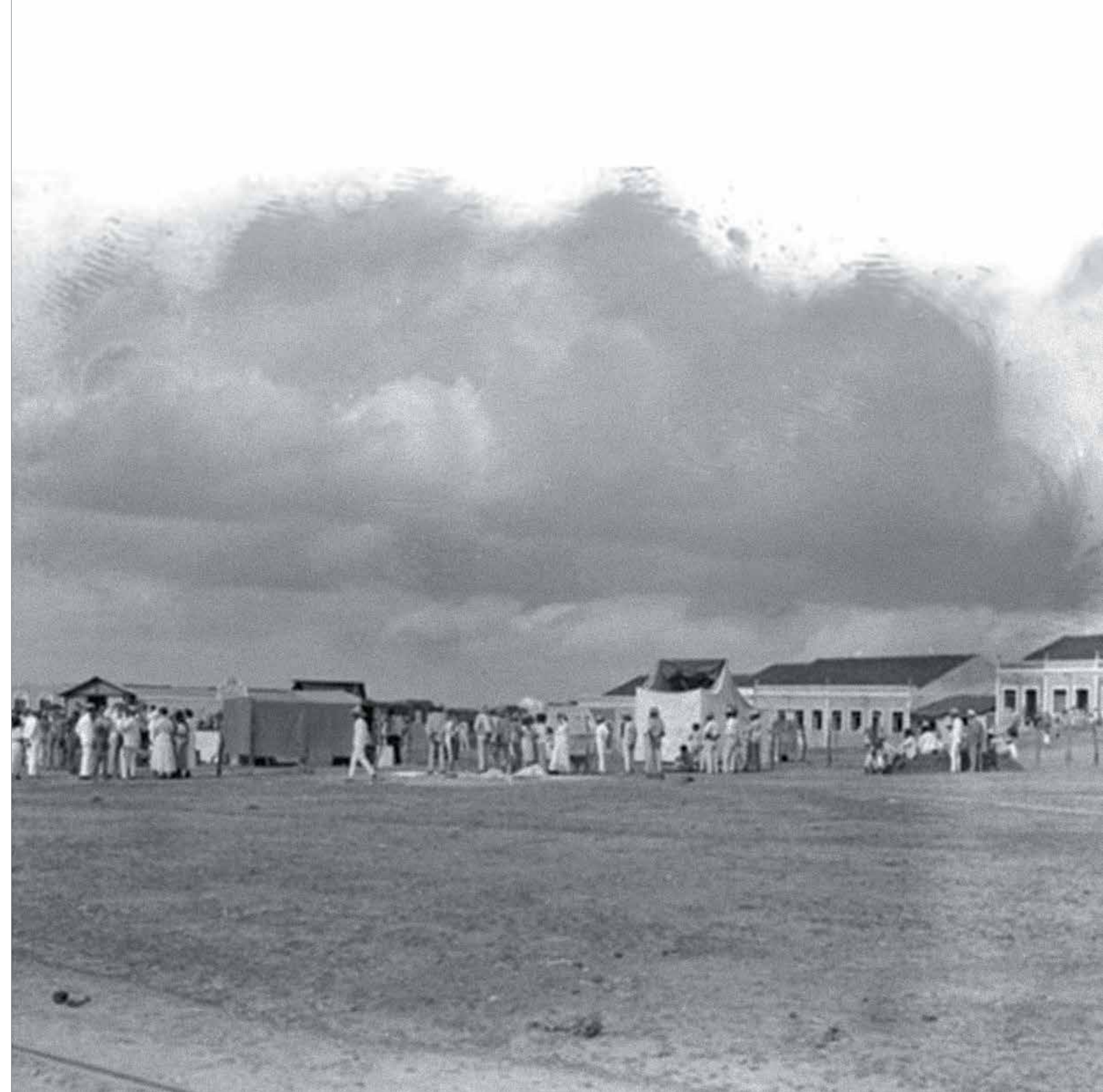
As nuvens mais espessas se localizavam justamente onde estava o Sol, mas pouco a pouco esse denso lençol começou a se atenuar. Uns 15 minutos antes da totalidade, uma leve brisa começou a empurrar as nuvens de leste para oeste e uma boa parte do disco solar já escuro pôde ser vista. Por fim, através de um buraco entre as nuvens, foi possível ver que o eclipse começava. Todos suspiraram de alívio!

Durante a totalidade, o Sol eclipsado pôde ser observado com certa facilidade. Mesmo a olho nu, o Tamanduá podia ser visto ser visto junto ao bordo do disco solar, assim como a coroa, com forma complexa e cores cambiantes com matizes de madrepérola.

ESPECTROSCOPIA

Foi levado para Sobral um espectroscópio Hilger com excelente óptica de quartzo, transparente ao ultravioleta, para analisar a composição da coroa solar perto dos limbos leste e oeste na zona equatorial. Podia produzir, ao mesmo tempo, espectro de quatro ou cinco locais da coroa em placas especiais no formato de 7,6 cm x 25,4 cm. Com esses espectros pretendia-se também determinar a velocidade de rotação do Sol pelo efeito Doppler. Desse instrumento ficaram encarregados de operar Domingos da Costa e Theophilo Lee.

Figura 15. Público de Sobral junto ao posto observacional da Comissão Brasileira e céu encoberto pouco antes da totalidade do eclipse. Crédito: ecl0022 de <http://www.on.br/placas/desktop/eclipse/eclipse.html>



Havia ainda mais dois espectroscópios menores de desvio constante¹³, também da marca Hilger com câmara fotográfica para espectro entre 4 e 8 mil Å (Figura 16). O Å (Ångström) é uma unidade de medida de comprimento: 1 Å equivale a 0,0000001 mm, ou seja, uma das 10 milhões de partes iguais em que 1 mm é dividido.

Espectroscópios normalmente têm uma fenda no plano focal para delimitar a região cuja luz se deseja analisar. Durante a totalidade formava-se nesse plano uma imagem do disco solar eclipsado circundado pela coroa. Desse modo, nesses espectroscópios menores o disco solar fazia o papel da fenda, que deixava na parte exterior toda uma extensão livre para permitir a passagem da luz da região da coroa solar que ali se projetava. O espaço do disco solar, obviamente, não produzia espectro, pois o Sol estava eclipsado, mas ficava reservado para, depois do eclipse, registrar o espectro de uma centelha de ferro que serviria de referência para a determinação do comprimento de onda das linhas do espectro da coroa.

Cada espectroscópio tinha seu *helióstato*¹⁴ e o que foi usado com o espectroscópio maior – fato notável – tinha sido construído no ON. O MAST conserva também, em seu acervo instrumental, vários espec-

13 Num espectroscópio de desvio constante, o ângulo entre o eixo do colimador (concentrador da luz que se deseja analisar) e do telescópio é mantido constante (90°) para todos os comprimentos de onda, o que é possível mediante a rotação de um prisma de flint (vidro com alta capacidade de dispersar espectralmente a luz).

14 O helióstato tem basicamente a mesma finalidade do celostato. Ambos precisam movimentar um espelho plano de modo a compensar o movimento diurno do Sol. Mas a imagem do Sol produzida pelo helióstato gira, ao passo que a produzida pelo celóstato mantém sua orientação fixa.

Figura 16.
Espectroscópios
Hilger iluminados
por helióstatos.
Fonte: Detalhe tirado
de sobral d2_0069 em
reeclipse100anos(6)
do Acervo do MAST.



troscópios e um sistema de relojoaria da marca Adam Hilger que podem ter sido usados no eclipse de Sobral.

Foi difícil, porém, ajustar e manter a imagem do Sol na fenda dos espectroscópios, porque ele esteve encoberto até dois ou três minutos antes da totalidade. Reveladas as placas, verificou-se com profundo desapontamento que nas do espectroscópio de quartzo não apareceu o espectro da coroa, e nem mesmo o de calibração com a centelha dos eletrodos de ferro, fotografado após o eclipse. A única explicação, segundo Morize, é que as placas teriam sido colocadas do avesso no chassi, embora fosse difícil admitir isso, já que os observadores tinham prática e a emulsão especial (anti-halo) permitia, mesmo no escuro, reconhecer facilmente a face que deveria ser exposta à luz. Assim, a velocidade de rotação do Sol também não pôde ser determinada.

As placas dos espectrógrafos menores foram analisadas no Observatório e duas foram aproveitáveis. Em meio aos documentos do MAST foram encontradas muitas folhas com anotações das medições das linhas

espectrais. Foram assinaladas linhas atribuíveis ao Chumbo, Cádmio, Estanho e Ferro, além das do Hidrogênio e Hélio e do hipotético Coronium.

UM TEMA ATÉ HOJE EM INVESTIGAÇÃO

Só em 1930 descobriu-se que a linha verde, atribuída ao Coronium, era produzida pelo prosaico Ferro, porém aquecido a temperaturas surpreendentemente altas, entre 1 e 2 milhões °C. Descobriu-se então que essas eram as temperaturas típicas da coroa solar.

Em sua comunicação na Sociedade Brasileira de Sciencia, Morize fez várias considerações sobre a composição da coroa. Na época eram propostas várias teorias, mas, pela insuficiência de dados observacionais, os autores não conseguiam confirmar questões como a presença ou não de polarização da luz (sintoma de partículas refletoras da luz); a presença ou não das linhas espectrais de absorção do Sol – cuja largura espectral poderia indicar a temperatura de diferentes partes da coroa –; ou a presença de linhas coronais de emissão. A informação crucial que faltava era a elevada temperatura da coroa, cerca de 2 milhões °C, na qual o hidrogênio – o elemento mais abundante no Sol – encontra-se completamente ionizado (sem o elétron), de modo que o grosso do brilho coronal era devido à reflexão da luz solar pelos elétrons livres.

Mas, incrivelmente, ainda hoje não se formulou uma teoria satisfatória para explicar como a coroa se aquece a essas temperaturas tão altas, tão maiores que a temperatura de 5.500° C da fotosfera. A *Parker Solar Probe*, missão atualmente em curso da NASA, objetiva investigar

in loco, ou seja, na própria coroa solar (embora na franja externa), os detalhes da sua expansão – que dá origem ao vento solar – bem como do seu aquecimento. O físico solar americano, Eugene Parker (1927-), pesquisador aposentado da Universidade de Chicago, elaborou a teoria do vento solar e também propôs seu modelo de aquecimento da coroa, que poderá ser testado na missão que leva o seu nome. A sonda foi lançada em agosto de 2018 e seu ingresso na coroa deve ocorrer em 2025.

De qualquer forma, hoje a Física Solar é, em boa parte, explanatória da natureza e do comportamento das manchas solares, bem como das influências da atividade solar na *magnetosfera*¹⁵ e *ionosfera*¹⁶ da Terra, graças ao suporte teórico da Magnetohidrodinâmica, ramo da Física que aplica a teoria eletromagnética de Maxwell a fluidos eletricamente condutores, como é a matéria coronal.

15 Corpos como o nosso planeta, que geram o seu próprio campo magnético no seu interior, possuem uma região circundante chamada *magnetosfera*. O campo magnético da magnetosfera da Terra interage o tempo todo com o campo magnético do Sol, trazido através do meio interplanetário pelo *vento solar* (gás extremamente quente, a cerca de 1 milhão °C, que escapa da coroa solar e atinge a Terra a cerca de 900 km/s). Essa interação se assemelha a um cabo de guerra, pois quando ocorrem intensas erupções solares, a magnetosfera atua como um escudo de proteção da nossa atmosfera e até mesmo da vida, contra partículas solares de alta energia.

16 A *ionosfera* se localiza na atmosfera da Terra entre 60 e 1 mil km de altitude. Nela os gases não são compostos de átomos ou moléculas eletricamente neutros, mas de íons positivos e elétrons (cargas negativas). Os íons e elétrons se formam quando átomos e moléculas perdem um ou mais elétrons, ou pela incidência de radiação energética como os raios ultravioletas ou X emitidos pelo Sol, ou pela colisão com cargas elétricas aceleradas a altas velocidades como os raios cósmicos ou emitidas pelo Sol. Por isso a ionosfera varia conforme as horas do dia, as estações do ano e a atividade solar.

EXPEDIÇÃO BRITÂNICA

A expedição inglesa era formada por duas duplas: uma enviada a Sobral, outra à Ilha do Príncipe. O grupo partiu de Liverpool em 8 de março de 1919, passou por Portugal – onde visitou rapidamente o Observatório Astronômico de Lisboa, na Tapada da Ajuda – e rumou para a Ilha da Madeira. De lá, a equipe que vinha para o Brasil seguiu no mesmo navio, que chegou a Belém em 23 de março. Como era muito cedo para prosseguir rumo a Sobral (pois a expedição brasileira nem estaria lá), a dupla decidiu seguir para Manaus para conhecer a Amazônia, retornando a Belém em 8 de abril. No dia 24 eles partiram de vapor para Camocim, onde chegaram no dia 29, seguindo no dia 30 para Sobral. Quando as demais expedições chegaram, portanto, os britânicos já estavam ali há nove dias.

A RELATIVIDADE GERAL CHEGA A EDDINGTON

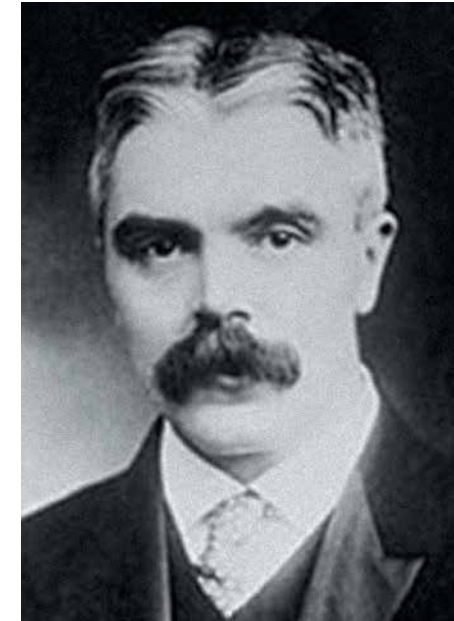
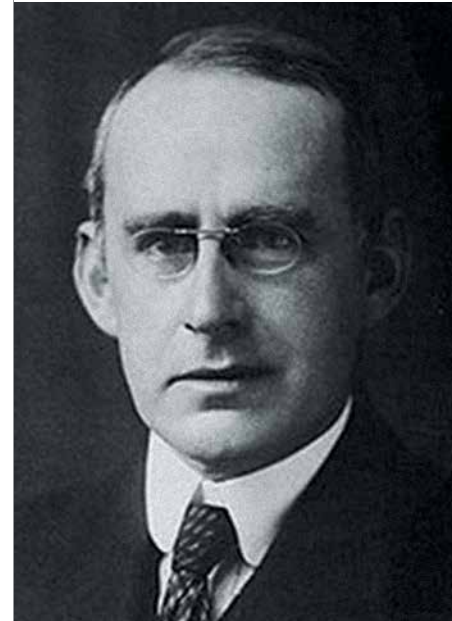
Para entendermos melhor o protagonismo das expedições britânicas de 1919 é importante acompanharmos os passos de Arthur Eddington (figura 17), um de seus mais relevantes protagonistas. Já vimos que Eddington havia vindo com Davidson para o eclipse de Minas Gerais, em 1912. Em 1905 ele havia sucedido Dyson (figura 18) – que fora nomeado Astrônomo Real da Escócia – no posto de Assistente Chefe do Observatório de Greenwich. Possivelmente nessa ocasião os dois se conheceram. Mas em 1910 Dyson se tornou o nono Astrônomo Real

Figura 17 (esquerda).

Arthur S. Eddington.
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Arthur_Stansley_Eddington

Figura 18 (direita).

Astrônomo Real,
Sir Frank W. Dyson.
Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Frank_Dyson#/media/Ficheiro:Frank_Watson_Dyson.jpg



da Inglaterra. Eddington, por sua vez, se tornou professor da Universidade de Cambridge em 1913 e diretor do Observatório daquela Universidade em 1914. Ele era um jovem brilhante da astronomia britânica e Dyson, 19 anos mais velho, teria se considerado seu mentor.

Quando Eddington deixou Greenwich e foi para Cambridge, deixou para trás a Astronomia de Posição, o estudo dos movimentos próprios e da dis-

tribuição espacial das estrelas – que envolviam a prática astronômica com o uso de telescópios e instrumentos de medição de placas fotográficas e a análise de dados –, passando então a se dedicar à Astrofísica Teórica. Esta última disciplina dava os primeiros passos nos promissores estudos sobre a estrutura e constituição das estrelas. Em 1917 Eddington já tinha angariado prestígio científico, inclusive por seus estudos em Astrofísica Estelar. Era famoso também por estar frequentemente envolvido em controvérsias com colegas, geralmente rudes e pouco cavalheirescas, mas sempre espirituosas. Por tudo isso, Eddington já era bastante conhecido bem antes do eclipse de 1919.

Nos meios científicos dos países anglófonos a recepção da Relatividade Restrita tinha sido quase uniformemente hostil e desdenhosa.

Os físicos ingleses tinham aderido, em sua maioria, à mecânica do *éter luminífero*¹⁷ – algo muito afastado da Relatividade. Esta era geralmente apresentada de forma crítica ou confrontada com teorias alternativas. A Relatividade Geral era ainda menos conhecida. Tratava-se de uma complementação mal conhecida de uma teoria importada e malvista.

Durante a I Guerra Mundial os ingleses não tiveram muito conhecimento das atividades científicas realizadas na Alemanha e nos países austro-húngaros, pois a colaboração entre os cientistas desses países esteve interrompida e, conseqüentemente, a comunicação direta entre os cientistas alemães de um lado, e os cientistas ingleses, franceses e americanos de outro, também estava interrompida. Revistas científicas alemãs como a *Annalen der Physik* não chegavam mais à Inglaterra. Para os cientistas aliados, muitos dos quais perderam filhos na I Guerra, o motivo do antigermanismo foi o “Manifesto dos 93”¹⁸, assinado em 1914 por cientistas e artistas alemães que apoiaram as ações belicistas do exército alemão rumo à guerra. Dentre eles estava nosso conhecido Max Planck. Já Einstein, que era um pacifista como Eddington, assinou um Manifesto contrário, opondo-se à entrada da Alemanha na I Guerra.

17 O éter era uma substância que preenchia o espaço vazio e era hipoteticamente necessária para possibilitar a propagação das ondas eletromagnéticas, portanto também da luz. Mas para a Teoria da Relatividade o éter era uma entidade supérflua.

18 O Manifesto assinado por *Professors of Germany*, dentro de um texto intitulado *To the Civilized World*, foi publicado em *The North American Review*, 210, 765, Aug. 1919, 284-287.

Em fevereiro de 1916, já como secretário da RAS, Eddington foi um dos primeiros a receber privadamente do cosmólogo Willem de Sitter (1872-1934) – colega da Holanda neutra – um pacote contendo os recentes artigos de Einstein sobre a Relatividade Geral, já traduzidos para o inglês. Assim, rapidamente ele soube da nova teoria e do valor correto da deflexão da luz. Ele se inteirou sobre o tema e já no fim desse ano o apresentou em grande reunião científica da *British Association for the Advancement of Science*, em Newcastle, chamando a atenção para a sua importância.

Em 1918 ele faria uma exposição detalhada, persuasiva e laudatória sobre a Relatividade Geral e suas aplicações para a *Physical Society of London*. Na contramão de tudo o que estava acontecendo, rapidamente Eddington se postou como uma exceção, comprometendo-se instintivamente com essa teoria, mais por razões estéticas e metafísicas do que empíricas. Foi quando ele teria cogitado fazer as observações no próximo eclipse solar para “pesar a luz” ou comprovar a predição de Einstein – embora para ele não houvesse como a Relatividade Geral não estivesse correta, assim como a predição da deflexão da luz.

Este próximo eclipse seria em 8 de junho de 1918 e a faixa da totalidade cruzaria de oeste a leste todo o território norte-americano. Mas, por causa da Guerra, Eddington não poderia viajar para os EUA. Por isso, consultou Campbell, do Observatório de Lick, sobre a possibilidade de ele fotografar esse eclipse. Campbell concordou, mas seus equipamentos tinham sido confiscados pelos russos em 1914 e isso o forçou a improvisar o telescópio com itens emprestados. As

observações foram feitas em Goldendale, WA, com ajuda do já citado Curtis. Embora as condições meteorológicas tivessem sido boas, Campbell usou um equipamento inadequado. Quando ele pediu para Curtis analisar as placas, este concluiu que as estrelas não tinham se deslocado, de modo que Einstein estaria errado. Mas Curtis não via a teoria de Einstein com simpatia. Para Campbell, o anúncio taxativo desse resultado negativo poderia solapar o projeto de Eddington, além de colocar em risco a reputação do Observatório de Lick, principalmente porque ele sabia que o instrumento inadequado poderia ter influenciado no resultado. Porém, em 11 de julho de 1919 – poucos dias antes do regresso de Eddington da expedição à Ilha do Príncipe – Campbell chegou a fazer uma comunicação preliminar na RAS especulando que os resultados obtidos por ele pareciam descartar o valor predito por Einstein.

PREPARATIVOS PARA A EXPEDIÇÃO

Em 1917, quando começavam as discussões sobre o envio de uma expedição britânica para um eclipse solar, Dyson – então no posto de Astrônomo Real – era a figura astronômica mais influente da Grã-Bretanha. Depois de alertá-lo sobre a importância da Relatividade Geral, Eddington associou-se a ele para organizar a jornada. Atraído pelo fato de que no eclipse de 29 de maio de 1919 o Sol estaria na frente do rico aglomerado estelar Híades, da constelação do Touro, Dyson se convenceu de que a expedição fosse feita para esse evento.

Ele também tinha experiência consolidada na Astronomia Observacional, pois trabalhara em *paralaxe estelar*¹⁹ em que tinha que fazer a análise fotográfica de diminutos deslocamentos angulares de estrelas. Analisando em fotografias de um eclipse ocorrido em 1905 em Sfax, na Tunísia, o brilho das estrelas de Híades até cerca de 6 raios solares do centro do disco solar²⁰, Dyson concluiu que, revelando as placas de

19 Paralaxe é a mudança da direção da linha de visada de um objeto mais próximo em relação a objetos mais distantes, ao mudarmos nosso ponto de observação. Esse é um fenômeno trivial que podemos constatar na paisagem terrestre e até mesmo, sem sair do lugar, apenas alternando a visão de um olho para o outro. Na Astronomia, para determinarmos a distância de uma estrela próxima, a distância entre os dois locais de observação deve ser bem grande; do contrário, o ângulo da mudança de direção será tão pequeno que nem poderá ser medido. Para medir a paralaxe das estrelas mais próximas em relação às estrelas de fundo bem mais distantes – que, por isso mesmo, aparentam ser fixas – uma observação é feita numa data e, cerca de seis meses depois, é feita a segunda observação. Isso porque, assim, a Terra se encontra na órbita ao redor do Sol em duas posições diametralmente opostas: a separação entre os dois pontos de observação (linha de base) tem cerca de 2 UA (Unidade Astronômica), duas vezes a distância média da Terra ao Sol, de 150 milhões km. Mas a paralaxe estelar é a metade dessa separação angular, porque por definição, ela é definida para uma linha de base de 1 UA. A maior paralaxe estelar, que é da estrela mais próxima (*Proxima* do Centauro) é de apenas 0,77”.

20 Num eclipse total do Sol é praticamente impossível obter uma boa imagem fotográfica de uma estrela que esteja a menos de 2 raios solares do centro do disco solar, pois aí o brilho da coroa solar ainda é intenso e tende a ofuscar a estrela. Contudo, também é difícil obter uma boa imagem de uma estrela que esteja a mais de 6 raios solares, desta vez pela falta de qualidade óptica das objetivas a essas distâncias radiais, especialmente quando as objetivas são lentes simples, como as usadas no eclipse de 1919. Assim, a região conveniente ao redor do Sol se confinava entre 2 e 6 raios solares do centro do disco solar.

forma adequada e contando com condições meteorológicas equivalentes às de Sfax, a objetiva do telescópio astrográfico²¹ do Observatório de Greenwich utilizado em 1905, seria capaz de detectar no eclipse de 1919 os pequenos desvios angulares preditos por Einstein em não menos que 13 estrelas brilhantes angularmente próximas ao Sol. O artigo dando conta desta análise, publicado em 1917, marcou o início da preparação da expedição britânica para o eclipse de 1919. Em nome da *JPEC*, que presidia à época, Dyson solicitou um financiamento de 100£ para os instrumentos e 1mil£ para a expedição. Os pedidos foram prontamente aceitos pelo governo britânico, o que é admirável face à escassez de recursos durante a Guerra. A decisão pelos dois postos de observação – Sobral e Ilha do Príncipe – foi tomada em uma reunião de 10 de novembro de 1917.

OBJETIVO – *EFEITO EINSTEIN*

A expedição britânica queria confirmar observacionalmente a previsão da deflexão da luz de Einstein com o valor correto. A motivação era confirmar um dos três testes clássicos da Relatividade Geral, propostos pelo próprio Einstein. Os outros testes eram a anomalia na pre-

21 Telescópios astrográficos, utilizados para a elaboração de catálogos estelares, eram dotados de lentes cujo campo visual abrangia grande extensão angular, tipicamente de alguns graus.

cessão do periélio de Mercúrio²² e o deslocamento para o vermelho de linhas espectrais sob a ação do campo gravitacional.

Podemos dizer, então, que a expedição britânica pretendia contribuir para o estabelecimento da Física Moderna, cujos pilares mestres eram as incipientes Relatividade e Mecânica Quântica. A Física Moderna descortinaria um novo e revolucionário entendimento dos fenômenos físicos. Entendimento esse que ultrapassaria os horizontes da Física Clássica e que abrangeria a Cosmologia Moderna, desde a origem microscópica do Cosmo numa flutuação quântica, até sua expansão macroscópica modelada numa totalidade espaço-temporal.

MÉTODO OBSERVACIONAL

A observação da deflexão da luz de uma estrela pelo Sol num eclipse constituía um desafio e tanto se considerarmos os recursos técnicos disponíveis em 1919. Para a observação foi feito o uso da fotografia que, para os astrônomos, tinha chegado em meados do século 19, sendo progressivamente aperfeiçoado nas décadas seguintes.

Nos instantes da totalidade do eclipse solar, a Lua esconde totalmente o Sol e o céu fica praticamente sem a claridade diurna, o que possibilita enxergar as estrelas, inclusive aquelas que se encontram

22 Este teste não era de uma predição. Nesse caso a Relatividade Geral apenas explicou um fato já conhecido.

no campo visual próximo ao Sol. Usando um telescópio acoplado a uma câmara com placas fotográficas, os astrônomos fotografavam o Sol eclipsado e as estrelas que apareciam ao seu redor.

De forma geral, quando observamos estrelas noturnas no céu, à exceção das poucas estrelas mais próximas, a maioria forma um padrão fixo, praticamente imutável na esfera celeste. Assim, cada estrela pode ser posicionada com precisão ao ser referenciada às estrelas vizinhas. Porém, o Sol é um astro astronomicamente próximo. Por isso, o Sol – assim como a Lua e os planetas do Sistema Solar – não mantêm posição fixa em relação às estrelas noturnas, mas se movem em relação a elas. Num eclipse total do Sol alguma estrela noturna poderá ser vista perto do disco solar, o que não significa que ela tenha literalmente se aproximado do Sol. Essa estrela, que na verdade se encontra muito, muito além do Sol, é vista da Terra angularmente perto do bordo solar por efeito de perspectiva. Nessa situação, um raio de luz proveniente dessa estrela passa realmente pelas proximidades do Sol e, pelo efeito da deflexão predito por Einstein, a trajetória da luz em vez de ser retilínea, sofre um pequeno desvio. Ora, sempre que vemos uma estrela, a vemos na direção de onde a luz dessa estrela chega até nós. Se essa direção é alterada por causa da deflexão pelo Sol, a estrela será vista no céu numa direção diferente. A deflexão da luz fica registrada na fotografia do eclipse na forma de um deslocamento da posição da estrela na placa fotográfica. Esse deslocamento não ocorre numa fotografia dessa mesma estrela tirada fora do eclipse, portanto a deflexão pode ser quantificada diferencialmente, através da comparação da posição de uma mesma estrela fotografada no eclipse (*placa do eclipse*) e fora dele (*placa de comparação*).

A deflexão angular máxima (quando a estrela se encontra idealmente no bordo do disco solar) é de apenas 1,75". Como vimos, de acordo com a Relatividade Geral, a deflexão decresce segundo o inverso da distância ao centro do disco solar. A observação em solo de um fenômeno com essa minúscula amplitude angular, inevitavelmente envolve múltiplas interferências que nada têm a ver com a própria deflexão. Algumas delas podem ser calculadas e removidas. Por exemplo, há o fenômeno astronômico da *aberração estelar*²³, que pode ser calculado para cada estrela em função de suas coordenadas na esfera celeste e do instante da observação. Este efeito pode ser removido da observação bruta por cálculo. Outro efeito que pode ser não calculado com exatidão, mas estimado na média, é a *refração atmosférica*. Este é um efeito devido à atmosfera da Terra. O ar tem um índice de refração muito próximo da unidade (índice de refração do vácuo), mas apenas levemente maior que 1. Para a luz visível ela é maior que 1 só na quarta casa decimal, mesmo assim a atmosfera refrata os raios de luz das estrelas. De um modo geral, a refração da atmosfera faz uma estrela parecer mais elevada em relação ao horizonte do que realmente está. Como o ângulo de refração aumenta com a densidade e, na atmosfera,

23 A aberração estelar é um fenômeno que faz com que uma estrela pareça estar numa posição no céu diferente daquela em que ela realmente se encontra. É que, quando fazemos a observação da Terra, não estamos parados, mas estamos orbitando com a Terra ao redor do Sol. À semelhança de uma chuva que cai verticalmente, mas aparenta estar caindo obliquamente contra nós quando nos pomos a correr, a luz proveniente de um astro também muda de direção de acordo com a direção e a velocidade do movimento orbital da Terra.

esta decresce com a altitude, a refração atmosférica é máxima no horizonte e vai diminuindo com a elevação até se anular no zênite (direção vertical do observador).

Como a atmosfera é turbulenta, isto é, com células de ar a diferentes temperaturas e densidades agitando-se caoticamente mesmo à noite²⁴, a refração atmosférica também varia caoticamente, de modo que apenas um valor médio da refração pode ser estimado em função da elevação observada da estrela, da temperatura ambiente, pressão e altitude do local de observação. Este efeito também é normalmente descontado, ainda que apenas com valores médios. A correção para os efeitos da aberração e da refração diferencial é rotineira nas observações astronômicas feitas em solo.

Medir a deflexão da luz no eclipse, pela comparação entre a placa do eclipse e a placa de comparação, envolve um método diferencial padronizado. Às vezes esse método pode ser modificado, o que efetivamente ocorreu com as placas do eclipse de 1919. Veremos que na análise das placas do eclipse da Ilha do Príncipe foram utilizadas placas obtidas em Oxford e em Príncipe, de um campo de estrelas que não era do eclipse, portanto não eram a rigor placas de comparação.

Já na fase de análise das placas, na máquina de medição micrométrica a diferença de posição de cada estrela na placa do eclipse e na placa de comparação era quantificada no milésimo do milímetro,

24 Trago à lembrança do leitor as luzes noturnas de uma cidade, perto do horizonte, que parecem piscar e tremular.

contando-se as voltas de um parafuso micrométrico. Infelizmente essas medidas, mesmo sendo corrigidas da aberração e da refração diferencial, ainda não eram as medidas procuradas da deflexão da luz porque continuavam contaminadas por outros efeitos espúrios praticamente incontroláveis.

Mesmo no procedimento padronizado, quando as placas do eclipse e as placas de comparação são obtidas no mesmo local, mas em datas diferentes, as fotografias não são tomadas exatamente na mesma direção do céu local, portanto com o telescópio apontando para direções diferentes, o que implica em flexões e torções que alteram o comportamento do telescópio de forma incontrolável. As temperaturas ambientes também são diferentes, não só porque as estações do ano são diferentes, mas porque o eclipse é observado de dia e as estrelas de comparação são fotografadas à noite. Elas não afetam apenas a intensidade da turbulência atmosférica, mas também o desempenho de itens ópticos como espelhos, lentes e placas fotográficas, além de eventualmente deformarem ou deslocarem o suporte desses itens nos instrumentos.

Devemos considerar ainda os problemas instrumentais como desalinhamentos e deformações decorrentes do transporte desde o observatório de origem até locais remotos de observação. Para facilitar o transporte, se optava por instrumentos de menor peso e tamanho, mas isso trazia a desvantagem de montagens menos robustas. Telescópios com objetivas menores exigiam tempos de exposição fotográfica mais longos que, por sua vez, dependiam mais criticamente da precisão do sistema de rastreamento do Sol se movimentando no céu, que era controlado por mecanismo de relojoaria acionado por peso.

INSTRUMENTOS

Uma objetiva de 13 polegadas com foco de 3,43 m do astrógrafo de Oxford, foi levada para Príncipe. Outra similar, do astrógrafo de Greenwich, seguiu para Sobral, junto com uma objetiva sobressalente do telescópio de 4 polegadas e foco de 19 pés (com o celóstato de 8 polegadas) da *Royal Irish Academy*. Foi esta última objetiva, levada apenas como estepe, que no fim das contas salvou a missão observacional de Sobral. Os dois telescópios astrográficos utilizavam placas de 16 cm x 16 cm, enquanto o telescópio de 4 polegadas utilizava placas de 10 polegadas x 8 polegadas.

Embora outros países como Alemanha, Estados Unidos e Argentina tivessem tentado há anos detectar a deflexão da luz, estava escrito nas estrelas que, no eclipse de 1919, só os britânicos estariam envolvidos nesse projeto com absoluta exclusividade.

OBSERVAÇÕES EM SOBRAL

A partida das expedições britânicas aconteceu quatro meses após o armistício que encerrou a I Guerra Mundial. Eddington e o técnico relojoeiro Edwin T. Cottingham (1869-1940) foram para a Ilha do Príncipe, na costa da atual Guiné Equatorial, e Davidson seguiu para Sobral (figura 19) na companhia de Andrew C. Crommelin (1865-1939). Os dois últimos eram assistentes do Observatório de Greenwich.

Na área do *Jockey Club*, com as corridas suspensas, a equipe inglesa montou os celóstatos de 16 e de 8 polegadas, cada um com o

Figura 19. Fotografia tirada ao lado da igreja do Patrocínio. Da esquerda para a direita, o 5º e o 6º são, respectivamente, Davidson e Crommelin; o 3º e o 8º, os americanos Wise e Thomson. Os demais são brasileiros. Fonte: Ecl0018 em <http://www.on.br/placas/desktop/eclipse/eclipse.html>



seu mecanismo de relojoaria acionado a peso, para que os celóstatos direcionassem constantemente os raios solares para as objetivas dos dois telescópios posicionados horizontalmente (figura 20). Nas extremidades dos telescópios, no fundo da cabana, ficavam as respectivas câmaras fotográficas. Nelas eram inseridos, com precisão, os estojos que protegiam a placa fotográfica da luz, exceto nos instantes em que ela devia ser exposta, mediante a remoção temporária de um anteparo corrediço opaco. Para ajustar o foco dos telescópios, a brilhante estrela Arcturus foi fotografada variando-se levemente o foco em torno da posição mais provável. O exame das fotografias do astrógrafo logo

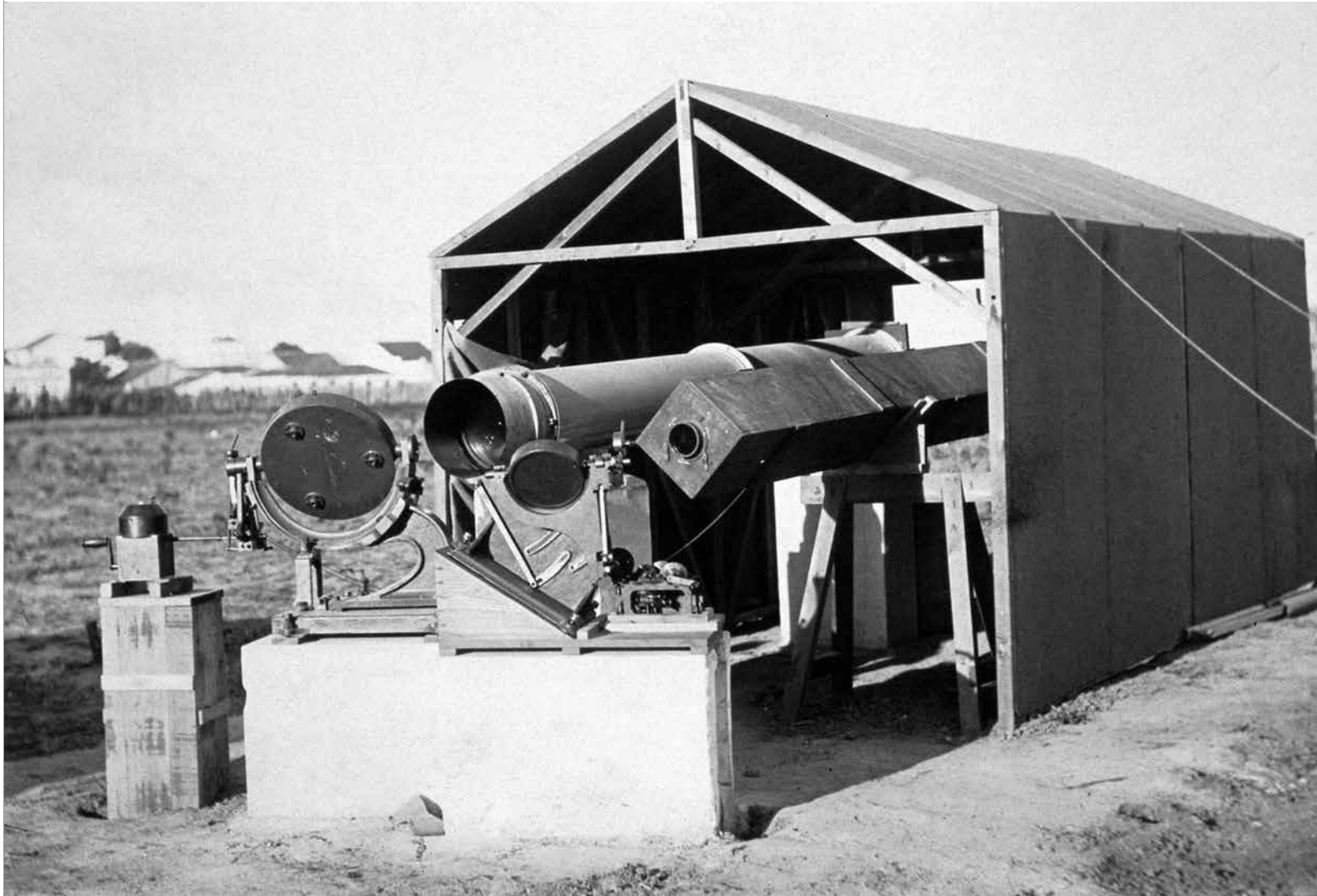
mostrou um sério problema de astigmatismo. Para reduzir esse problema, foi colocada uma máscara que obturou a objetiva do telescópio astrográfico de 13 para 8 polegadas, o que atenuou o defeito em boa medida. Geralmente o defeito óptico de astigmatismo se apresenta mais na região periférica de uma lente. Assim, a máscara obturadora suprimia da imagem final os raios periféricos da objetiva. Daí em diante a máscara foi sempre mantida, mas o desempenho desse telescópio ainda iria desapontar os observadores. Já as imagens do telescópio de 4 polegadas mostraram-se satisfatórias.

Durante a totalidade do eclipse, de acordo com a programação, foram expostas 19 placas no telescópio astrográfico com durações alternadas de 5 e 10 s²⁵ e 8 no telescópio de 4 polegadas com tempo mais longo de 28 s²⁶. A região ao redor do Sol esteve livre de nuvens, exceto durante cerca de 1min perto do meio da totalidade, quando o Sol ficou velado por uma tênue nuvem que impossibilitou fotografar as estrelas, mas permitiu registrar a coroa interna do Sol e a protuberância Tamanduá com excelente definição, o que alegrou os observadores de fenômenos solares. Todas as placas utilizadas permaneceram protegidas em seus estojos à prova de luz até a revelação, que foi realizada em vários lotes nas horas noturnas dos dias seguintes (por causa da temperatura ambiente mais baixa), sendo completada no dia 5 de junho.

25 Em algumas dessas placas apareceram 12 estrelas, em outras 7, mas em 3 placas não apareceram nem mesmo 7 estrelas.

26 Nessas placas apareceram 7 estrelas mensuráveis, exceto na de número serial 6, quando surgiram nuvens e nenhuma estrela apareceu.

Figura 20. Objetivas de 13 e 4 polegadas posicionadas para serem iluminadas pelos celóstatos de 16 e 8 polegadas, respectivamente. A fotografia mostra o mecanismo de relojoaria dos dois celóstatos. Fonte: <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co56649/photograph-of-the-instruments-used-by-the-british-expedition-when-observing-the-1919-total-Solar-eclipse-in-brazil-black-and-white-print-photograph-ancillary-instrument-astronomical-instruments-refracting-telescopes-heliostats-astronomical-Solar-eclipse>



Depois a equipe deixou Sobral e foi visitar Fortaleza, retornando a Sobral no dia 9 de julho para obter as placas de comparação. Essas placas foram obtidas entre 10 e 17 de julho, totalizando 41 exposições no telescópio astrográfico e 18 no telescópio de 4 polegadas. Uma dessas, porém, em vez de ser placa de comparação se tornou placa de escala, tendo a emulsão fotossensível exposta à luz, não diretamente, mas através da placa de vidro (substrato), o que tornaria mais precisa a medição dos desvios das estrelas. Ao fazer a medição dos desvios das estrelas nas placas obtidas com o telescópio de 4 polegadas, cada placa do eclipse foi superposta à placa de escala, de modo que as imagens comparadas ficassem em contato direto, sem a separação da espessura do substrato de vidro da placa. Assim foi feito porque as placas não tinham as dimensões usuais das utilizadas nos telescópios astrográficos e o micrômetro respectivo tinha menos recursos.

Após o encerramento do trabalho em Sobral, os créditos pelo sucesso nos resultados foram divididos com Morize, líder da expedição brasileira, que recebeu merecidos agradecimentos formais da expedição britânica. Em 24 de novembro de 1919 Dyson enviou uma calorosa carta de agradecimento, em nome da JPEC (figura 21). O presidente da RS, J. J. Thomson, também enviou para Morize, através da embaixada do Brasil em Londres, uma carta de agradecimento datada de 24 de janeiro de 1920.

Figura 21. Carta de agradecimento de Dyson para Morize. Fonte: "sobral d2_0027" em "reeclipse100anos (3)", Acervo do MAST.

693/Q.3.



Royal Observatory, Greenwich,
London, S.E.

1919 November 24.

Dear Dr Morize,

On behalf of the Eclipse Committee of the Royal Society and Royal Astronomical Society, I desire to express to you our thanks for your great kindness and assistance to Dr. Crommelin and Mr Davidson. They tell us they were indebted to you at every turn.

You will be very glad to hear that the Expedition was completely successful. The results were announced at a crowded Meeting of the Royal Society on November 6. They have been received by scientific men and the British public generally with a degree of interest for which I can remember no parallel.

From my own experience of Eclipse Expeditions, I know the difficulties, and understand to what a large extent success is dependent on the good will and voluntary assistance accorded to the observers. In Brazil they lacked nothing, and this was mainly due to the excellent way in which you, as an Astronomer, were able to carry into effect the generous provisions of the Brazilian Government.

I am,
Yours very truly,

F. W. Dyson
Astronomer Royal.

V. officio Nº 688
18 de Dezembro 1919
Cop.

OBSERVAÇÕES EM PRÍNCIPE

Eddington e Cottingham chegaram à ilha no final da estação chuvosa, quando um vento seco passou a dominar, só voltando a chover na manhã do eclipse. A instalação dos equipamentos foi feita lentamente, pois não havia interesse em desempacotar logo o espelho e os instrumentos para expô-los desnecessariamente à umidade. Os primeiros testes fotográficos começaram em 16 de maio, quando houve dias de céu claro, inclusive à noite. O relógio acionado a peso para movimentar o celóstato podia funcionar por até 36 minutos sem receber corda. A objetiva do telescópio também foi obturada de 13 para 8 polegadas, como em Sobral, para a obtenção de todas as fotografias. Uma série de fotografias de Arcturus, com tempo de exposição de 1s, certificou que não ocorriam vibrações indesejáveis do telescópio após a colocação da placa. Nos ajustes foi dada especial atenção ao paralelismo entre a objetiva e a placa e aos preparativos para o apontamento correto do telescópio ao campo desejado.

A focalização também foi ajustada através de fotografias de estrelas e, como a temperatura se manteve uniforme (incrivelmente estável, conforme os relatos), ela foi mantida nas observações. Os dias que precederam o eclipse foram bastante nublados e na manhã do eclipse ocorreu uma forte tempestade entre 10h e 11h30 (horário local), uma ocorrência extraordinária para aquela época do ano. Mas, segundo os cálculos, o início da totalidade seria às 14h13min5s, com duração de 5min2s. Depois da tempestade o Sol apareceu por alguns minutos, mas as nuvens se juntaram de novo. Cerca de meia hora

antes do eclipse, o crescente solar foi visto ocasionalmente e, por volta de 13h55, ele pôde ser visto continuamente entre nuvens à deriva. Durante a totalidade foram feitas as exposições programadas e obtidas 16 placas. Examinando as estrelas que apareceram nas fotografias, pareceu que as nuvens se dissiparam consideravelmente durante o último terço do eclipse.

Assim como em Sobral, para a revelação das placas em Príncipe também foi necessário cuidado com a temperatura elevada da água. Antes do eclipse não houve problema, porque havia suprimento local de gelo. Mas esse suprimento falhou depois do eclipse e o formol teve que ser utilizado para enrijecer a emulsão fotográfica. As placas que aceitavam bem esse tratamento foram reveladas em Príncipe à noite, quando a temperatura era mais baixa, e a secagem foi acelerada com uso de álcool. Já as demais placas foram mantidas nos respectivos estojos, para serem reveladas depois do retorno da expedição.

Pretendia-se fazer lá mesmo todas as medições das placas reveladas, mas uma greve na companhia de navegação tornou necessário regressar na primeira embarcação, a fim de que a expedição não ficasse retida na ilha por vários meses. A expedição deixou Príncipe no dia 12 de junho, chegando a Liverpool em 14 de julho. Mas não foi por isso que não foram obtidas em Príncipe as placas de comparação, como foi feito em Sobral. Em Príncipe a totalidade ocorreu mais tarde no horário local. Nesse caso, para o campo de estrelas próximo ao Sol no eclipse ser visto novamente fora do eclipse, antes do amanhecer e aproximadamente na mesma posição no céu local, seria preciso esperar muitos meses. Então a falta de placas de com-

paração foi compensada com um outro tipo de placas, as de verificação (*check plates*), uma parte obtida em Oxford e outra em Príncipe. Placas de comparação continham estrelas vizinhas ao Sol no eclipse; já as de verificação continham estrelas de uma outra região do céu e serviam principalmente para eliminar eventuais variações de escala. Nas placas de verificação, o campo de estrelas que incluía Arcturus tinha praticamente a mesma declinação do campo do eclipse, o que ajudava a tornar similar a estabilização do telescópio em Príncipe e em Oxford. Um fator positivo dessas placas para o controle do experimento era que elas eram obtidas à noite tanto em Oxford como em Príncipe, evitando-se assim a influência do aquecimento do espelho e do telescópio pelo Sol. Em Príncipe, cinco placas de verificação foram obtidas nas noites de 22 e 25 antes do eclipse, mas outras cinco já haviam sido obtidas em Oxford em 16, 17 e 23 de janeiro, antes da partida da expedição. Adicionalmente Eddington já tinha garantido também em Oxford, nas noites de 16 e 22 de janeiro e 9 de fevereiro, cinco placas de comparação com o campo estelar do eclipse.

ANÁLISE DAS IMAGENS

Ainda em Príncipe, apenas uma de duas fotografias aproveitáveis do eclipse pôde ser revelada. Essas fotografias, como sabemos, tinham sido obtidas através de reflexão pelo espelho do celóstato. Quando as placas do eclipse de Príncipe e de comparação feitas em Oxford foram superpostas, as emulsões (portanto as imagens) ficaram em contato

direto, o que favorecia a medição dos desvios de cada estrela. Com um micrômetro levado a Príncipe, Eddington mediu os desvios de cinco estrelas nas duas coordenadas. Descontos para a refração atmosférica, aberração, orientação da placa etc. – que são rotineiros na determinação da paralaxe estelar e com os quais Eddington tinha familiaridade – foram feitos e ele concluiu (notar a confissão espontânea de viés): *“The results from this plate gave a definite displacement, in good accordance with Einstein’s theory and disagreeing with the Newtonian prediction. Although the material was very meagre compared with what had been hoped for, the writer (who it must be admitted was not altogether unbiassed) believed it convincing”*.

Um primeiro resultado tão promissor deve ter consolidado em Eddington uma postura mental otimista que, de fato, ele já tinha e manteve durante toda a análise. Segundo o testemunho do astrofísico teórico indiano Subramanyan Chandrasekhar (1910-1995), Prêmio Nobel de Física de 1983 – que conviveu academicamente no início de sua carreira com Eddington –, a fé deste na teoria de Einstein era apriorística. Segundo Chandrasekhar, o britânico teria lhe dito que se o envio das expedições para o eclipse dependesse dele, ele nem as enviaria, *“since he was fully convinced of the truth of general relativity.”*

Quatro placas do eclipse, que não puderam ser reveladas em Príncipe, foram reveladas em Cambridge e só uma delas mostrou estrelas em quantidade suficiente. Nela as medições também foram feitas por Eddington em 22 e 23 de agosto, segundo o mesmo procedimento usado na placa anterior e também teriam confirmado a predição de Einstein.

Mas, neste ponto, Eddington diz que se preocupou se algum problema instrumental poderia ter produzido um “falso positivo”, um simulacro do efeito desejado. Foi um recuo cautelar. Para responder a essa dúvida Eddington disse que apelou para as placas de verificação que registraram em Príncipe e em Oxford um mesmo campo estelar, mas que não era o do eclipse. Eram 5 placas de Príncipe e 5 de Oxford, com as quais Eddington formou pares e ele próprio fez as medições. Os desvios (Príncipe – Oxford) nas duas coordenadas foram medidos para cada estrela (13 no total) nos 5 pares de placas. Eles foram modelados pelas equações de condição e seus coeficientes (desta vez, sem os da deflexão da luz) foram obtidos por mínimos quadrados aplicados às equações normais. Com esses coeficientes foram calculados os residuais para cada uma das 13 estrelas. Tirando a média de todos os residuais, Eddington concluiu que o erro provável na medição dos desvios era de apenas $\pm 0,22''$. Seguindo esse procedimento não protocolar, ele concluiu não haver erros sistemáticos significativos: *“The primary purpose of the check plates is thus fulfilled. They show that photographs of a check field of stars taken at Oxford and Principe show none of the displacements which are exhibited by the photographs of the eclipse field taken under precisely similar instrumental conditions. The inference is that the displacements in the latter case can only be attributed to presence of the eclipsed sun in the field.”*

Eddington ainda acrescentou: *“That seems to be satisfactory evidence that the displacement observed during the eclipse is really due to the sun being in the region, and is not due to differences in instrumental conditions between England and Principe. Indeed the only possible loophole is a diffe-*

rence between the night conditions at Principe when the check-plates were taken, and the day, or rather eclipse, conditions when the eclipse photographs were taken. That seems impossible since the temperature at Principe did not vary more than 1° between day and night.” A frase final, embora audaciosa ao considerar equivalentes as condições ambientais noturnas e diurnas, foi usada com forte teor argumentativo.

O uso de placas de verificação para as imagens de Príncipe foi inconveniente e constituiu, nas próprias palavras de Eddington, Dyson e Davidson, *“an extraneous determination of scale”*, mas teria permitido isolar e melhor medir a variação da escala da placa, evitando o problema inerente às placas do eclipse nas quais a variação de escala se mistura com a deflexão, ambas afastando as estrelas do centro do disco solar, muito embora a deflexão decresça segundo o inverso da distância radial e a variação da escala cresça linearmente com ela.

A análise das duas placas aproveitáveis do eclipse de Príncipe foi então refeita, desta vez com as placas de comparação de Oxford contendo o campo estelar do eclipse, mas levando em consideração o erro de escala obtido anteriormente, de forma independente. Embora em Príncipe as placas do eclipse tivessem sido feitas de dia, e as de comparação à noite em Oxford, Eddington se fiou de novo em que a variação da temperatura durante o eclipse tinha sido mínima. Segundo ele, a temperatura ambiente em Príncipe durante o eclipse manteve uma extraordinária estabilidade. Com isso justificou a variação de escala que estava usando e presumiu ter obtido a deflexão da luz para cada estrela. Com base em 5 estrelas foram feitas 4 determinações da deflexão da luz cuja média foi $1,61'' \pm 0,30''$ no bordo do disco solar,

valor próximo da predição de 1,75”, o que tornava muito improvável a metade desse valor predita pela teoria newtoniana.

A esta altura dos acontecimentos, para Eddington a questão já estava resolvida além de qualquer dúvida e, assim, ele aguardava o retorno da expedição de Sobral – que lá permaneceu mais dois meses – para obter, de madrugada, tanto com o astrógrafo quanto com o telescópio de 4 polegadas, as placas de comparação.

SOBRAL X PRÍNCIPE

Apesar da obturação da objetiva do astrógrafo usado em Sobral, que melhorou o seu desempenho óptico, as fotografias foram surpreendentemente desapontadoras, mais ainda porque desse astrógrafo eram esperadas as melhores imagens. As estrelas, longe de serem pontuais, apareceram difusas e extensas, como se estivessem fora de foco e, além disso, arrastadas por irregularidades no rastreio. Segundo os observadores, na noite anterior ao eclipse o foco estava perfeito. Esse problema não apareceu quando foram feitas as placas de comparação depois do eclipse, sem que nenhum reajuste tivesse sido feito. De fato, as placas de comparação não apresentaram nenhum problema de foco. Os observadores concluíram que se tratava de um problema temporário (por isso mesmo, mais estranho ainda) ocorrido no eclipse e o atribuíram a uma expansão não uniforme do vidro do espelho, causada pela incidência dos raios solares, não sendo possível saber se, além de possível astigmatismo que causa inde-

finição na imagem, teria ocorrido também perda de foco que altera a escala das placas. Na prática era impossível discriminar esses efeitos porque, definitivamente, as imagens tinham baixa qualidade, o que dificultava a medição dos desvios.

Apesar do pessimismo confesso dos próprios observadores, essas placas foram as primeiras a serem medidas após o regresso. Dada a má qualidade das imagens, medidas foram tomadas só numa das coordenadas (y), considerada mais confiável. Supondo que o erro dominante fosse de focalização (e consequentemente de escala), com base em seis estrelas de 16 placas do eclipse e nove placas de comparação, o valor médio da deflexão resultou ser 0,93”, sem estimativa do erro provável. Isso era cerca da metade do valor que seria obtido com o telescópio de 4 polegadas e, também, mais próximo da previsão da teoria newtoniana. Na análise que estava em curso, esse era um resultado perturbador, especialmente para Eddington, pois era muito discrepante daquele que ele tinha obtido com as placas de Príncipe, nas quais ele depositava total confiança.

Apesar das reservas em relação às imagens do astrógrafo de Sobral, era difícil descartá-las tendo em vista o escasso material de Príncipe e a relativa abundância de dados colhidos sob o céu aberto do Ceará. Além disso, as imagens de Príncipe também não eram bem definidas e estavam turvadas pela nebulosidade. Mas Eddington converteria a presença dessa nebulosidade geral em vantagem para suas placas de Príncipe. Com efeito, Eddington atribuiu a elas uma alta confiabilidade argumentando que o número maior de placas e de estrelas de Sobral era menos relevante porque estava em pauta uma questão de

erro sistemático²⁷, além de que duas estrelas nas placas de Príncipe estavam perto da posição de deflexão máxima (estrelas noutras posições contribuíam menos); e a detecção em Sobral de estrelas 2 magnitudes mais brilhantes teria mais causado uma exposição excessiva dessas estrelas, cujas medições teriam sido prejudicadas por erros sistemáticos.

Em suma, Eddington considerou que o ponto forte das poucas placas de Príncipe era que, com a ajuda das placas de verificação, elas tinham sido aprovadas no teste de erros sistemáticos. As placas de Sobral nem placas de verificação tinham. Outro ponto a favor das placas de Príncipe, segundo Eddington, era que lá não houve o efeito pernicioso dos raios solares no espelho, pois o véu de nebulosidade tinha atenuado a fulgurância do Sol. As condições climáticas em Príncipe no eclipse teriam sido realmente excepcionais, tanto que foram consideradas altamente improváveis em futuros eclipses. A temperatura ambiente se manteve incrivelmente uniforme, sem sair de um intervalo de 4° durante toda a visita, inclusive de dia e de noite, na estação quente e chuvosa ou seca e fria. Durante o eclipse não houve queda perceptível de temperatura antes da totalidade.

Assim, por culpa da má qualidade das imagens, as placas do astrógrafo de Sobral foram simplesmente descartadas, o que se tornou alvo de críticas, já que essas imagens não eram muito piores do que as de Príncipe, nem impossibilitaram a realização de medições. De Sobral

27 Eddington considerou que os erros relevantes das medidas não eram aqueles que se distribuem aleatoriamente em torno de uma média, mas os que deslocavam sistematicamente a média para um outro valor.

restaram, então, 7 placas obtidas com a objetiva de 4 polegadas. Suas medições se atrasaram pela necessidade de se adaptar o micrômetro para portar placas de um tamanho não usual. De antemão ninguém duvidou que a decisão final repousava nessas placas, uma vez que as imagens eram quase ideais e ainda tinham escala maior que a das outras placas. Mas o manejo do telescópio de 4 polegadas tinha imposto aos observadores grandes dificuldades: o comprimento desajeitadamente grande do telescópio que tinha um foco de 19 pés (5,8 m); o tempo de exposição mais longo exigido pelo tamanho menor da objetiva (10 cm), o que exigia do mecanismo de relojoaria um rastreio mais longo e preciso e a escala de placa maior que tornava o foco mais crítico a vibrações. Não obstante, os observadores em Sobral obtiveram com esse telescópio imagens que superaram todas as expectativas.

Usando a placa de escala (algo também não protocolar), os desvios foram medidos para cada uma das 8 estrelas selecionadas em todas as 7 placas do eclipse. Uma vez tratados estatisticamente, obteve-se a média da deflexão da luz para o conjunto das placas do eclipse. Dessa média se subtraiu a média da deflexão obtida para o conjunto das placas de comparação, que é um resíduo associável a uma deflexão teoricamente nula. Depois da correção para a refração diferencial e a aberração, obteve-se o valor final da deflexão no limbo solar de 1,98” com erro provável de $\pm 0,12$ ”. A possibilidade de erro sistemático foi afastada após a constatação de um padrão satisfatório de similaridade entre as imagens estelares das placas do eclipse e das placas de comparação.

Saiu então o veredito final confirmando a deflexão de Einstein. Foi atribuído um peso estatístico maior à deflexão de 1,98” $\pm 0,12$ ” obtida

com as placas de Sobral com o telescópio de 4 polegadas, principalmente porque essas imagens tinham melhor qualidade, o erro provável era menor e a escala da fotografia era maior.

Tendo sido declarado antes que o objetivo da observação do eclipse era discriminar qual seria o resultado dentre as três alternativas: 1) deflexão nula: nenhum efeito gravitacional na luz; 2) deflexão total de 1,74" predita pela teoria einsteiniana e 3) metade dessa deflexão predita pela teoria de Newton e considerando, finalmente, que a deflexão da luz decresce segundo o inverso da distância ao centro do disco solar, tanto na previsão de Einstein quanto na de Newton, foram tomados os valores médios da deflexão de 7 estrelas das placas de Sobral com o telescópio de 4 polegadas. Esses valores foram lançados num gráfico que mostra a deflexão da luz versus distância radial da estrela (imagem ao lado). A curva resultante (linha fina) foi comparada ao decaimento radial da deflexão einsteiniana (linha grossa) e da deflexão newtoniana (linha pontilhada) e se mostrou conveniente para argumentar, não tanto o valor preciso da amplitude da deflexão, mas que a amplitude da deflexão einsteiniana era decididamente maior que a da deflexão newtoniana.

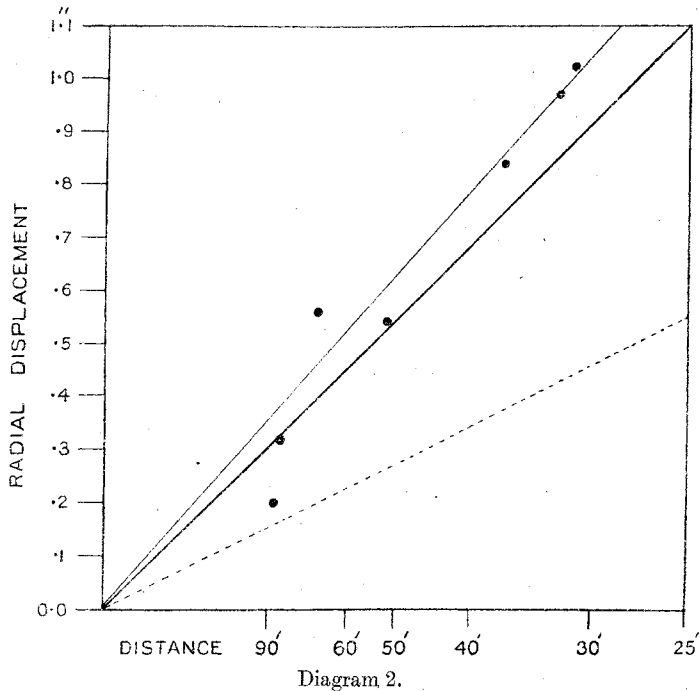


Figura 22. Deflexão da luz versus distância radial da estrela. Gráfico extraído da pág. 332 de <http://w.astro.berkeley.edu/~kalas/labs/documents/dyson1920.pdf>

O artigo mais importante sobre o resultado das observações do eclipse termina menos categoricamente do que começa, ao propor com certa incoerência que novas observações fossem feitas: *“The results of the expeditions to Sobral and Principe can leave little doubt that a deflection of light takes place in the neighbourhood of the sun and that it is of the amount demanded by Einstein’s generalised theory of relativity, as attributable to the sun’s gravitational field. But the observation is of such interest that it will probably be considered desirable to repeat it at future eclipses.”* O texto também recomendava que nas observações futuras de eclipses se evitasse o uso do celóstato, cujo espelho, ao refletir a luz solar, sofria aquecimento e consequentes deformações que deterioravam a imagem. Para dispensar o espelho recomendava que o telescópio fosse instalado numa montagem equatorial. Esta, aliás, é a montagem mais usual, que mantém a objetiva do telescópio continua e diretamente apontada para o Sol.

ANÚNCIO DOS RESULTADOS

A impressão mais difundida é a de que as placas do eclipse foram analisadas e os resultados teriam confirmado irrefutavelmente o *efeito Einstein*. Assim sendo, foram divulgados para o grande público. No entanto, uma análise histórica mais crítica, aqui omitida, nos leva a concluir que a sucessão dos acontecimentos não foi linear. Embora uma análise crítica não seja capaz de apontar para descaminhos, ela oportuniza colocar em debate questões concernentes ao *ethos* (crenças e

hábitos) da comunidade científica. Não é importante que só o conhecimento científico seja divulgado ao grande público, mas esse *ethos* também deve fazer parte do letramento científico. Mais ou menos a partir da década de 1970, portanto muitas décadas depois da *Revolution in Science* – isso é, do anúncio bombástico da confirmação da deflexão da luz predita por Einstein e da sua Teoria da Relatividade Geral – houve uma transformação nos estudos da história das ciências que revisou as concepções de análise vigentes até então.

TECNOLOGIAS DE PRECISÃO. SUPERCONFIRMAÇÃO

A falta de uma confirmação contundente, por cerca de quatro décadas, do resultado obtido por Eddington em 1919, constitui um fato que deve encerrar algum significado. Isso, somado à falta de confirmação do deslocamento gravitacional de linhas espectrais para o vermelho, estabeleceu um quadro negativo que, às vezes, serviu de alegação para se duvidar da Relatividade Geral, o que tornava difícil justificar novas expedições para tentar confirmar a deflexão einsteiniana da luz. Então, após a euforia inicial, houve um arrefecimento do interesse pela Relatividade, que se refletiu inclusive num decréscimo de publicações sobre esse assunto. Isso ficou claro também na criação, em 1922, da Comissão 1 da *International Astronomical Union (IAU)* sobre Relatividade, sob a coordenação de Eddington, e sua extinção já em 1925. Em 1922, o famoso matemático e filósofo inglês Alfred N. Whitehead

(1861-1947) que tanto enaltecera o anúncio feito na sessão conjunta, elaborou uma teoria alternativa da gravidade que, rejeitando a ideia de que a matéria podia encurvar o espaço-tempo, mantinha o espaço-tempo plano da Relatividade Restrita, mas incluía um tensor que, através de uma “ação a distância”, causava a deflexão da luz predita por Einstein e o movimento orbital da matéria, sem prever no entanto o deslocamento espectral para o vermelho.

Esse quadro mudaria nos anos 1960 com o avanço das “tecnologias de precisão”, graças ao surto de desenvolvimento instrumental no início do programa espacial (fruto da II Guerra) e ao advento dos computadores. Assim, um avanço espetacular ocorreu em 1967 como um desdobramento da técnica radioastronômica inaugurada fortuitamente em 1932. Nesse ano o Universo passou a ser observado não só na luz visível, mas também através de ondas de rádio. Em 1967 se descobriu que, com medições simultâneas feitas com vários radiotelescópios distribuídos sobre o globo usando a técnica de interferometria VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), podia-se medir a deflexão, desta vez, das ondas de rádio com precisão da ordem de 0,001”. Para simples comparação, por causa do fenômeno da cintilação causada pela turbulência atmosférica, a posição de uma estrela observada na luz visível é afetada por uma incerteza típica da ordem de 1”. Agora, em ondas de rádio a precisão das medidas era mil vezes melhor. Com a técnica VLBI podem ser usadas, em vez de estrelas de fundo da nossa própria Galáxia, os quasares, que são astros extragalácticos de aparência pontual. Suas distâncias cosmológicas asseguram maior estabilidade como referências posicionais. É impressionante constatar como a incerteza

das medidas foi reduzida drasticamente desde 1970, sendo que agora ela é da ordem do décimo de milésimo da deflexão predita por Einstein. Assim, para centenas de rádio-fontes a deflexão foi medida e a predição de Einstein foi confirmada.

Como se não bastasse, a mesma técnica radioastronômica possibilitou uma nova forma de verificação não predita por Einstein, com o mesmo grau de precisão, na qual é medido na Terra não o desvio angular da radiação, mas o atraso temporal de um sinal de radar transmitido da Terra para um satélite artificial, no qual um transponder transmite esse sinal de volta para a Terra. Durante o experimento, o sinal de radar se propaga através do campo gravitacional do Sol. Esse atraso do sinal é conhecido como *efeito Shapiro* porque o radioastrônomo americano Irwin I. Shapiro (1929-), professor da Universidade de Harvard, propôs e realizou a verificação desse efeito.

Hoje, então, a questão não é mais confirmar a deflexão gravitacional da luz. Ela é uma certeza que deu lugar a um novo recurso observacional que potencializa exponencialmente a capacidade dos nossos telescópios. A deflexão da luz, quando ocorre em massas muito maiores do que a de uma estrela como o Sol – como a massa de uma galáxia ou de um aglomerado de galáxias – produz deflexões angulares mais pronunciadas sobre a luz, alterando a forma e o brilho da imagem de um objeto cosmológico que esteja atrás e praticamente alinhado em relação a nós, na Terra. Várias imagens do Telescópio Espacial Hubble de quasares distantes que assumem a forma de um anel ou de uma cruz, ou que ganham duplicidade, resultam do fenômeno cósmico natural agora chamado com total propriedade *lente gravitacional*, pois, de

fato, a deflexão gravitacional da luz por massas muito grandes pode produzir intensificação da imagem, à semelhança das lentes dos telescópios ópticos.

Há também as *microlentes gravitacionais* causadas por massas menores, como de estrelas, que também são úteis porque permitem investigar objetos com massa intermediária entre a massa de um planeta e a massa de uma estrela. Portanto a deflexão da luz acabou nos brindando com novas ferramentas que já se tornaram corriqueiras para a observação da massa e estrutura de galáxias e quasares distantes, de objetos cosmológicos de grande escala, como também de exoplanetas orbitando estrelas distantes. As lentes podem ser usadas também como balanças para medir a massa de objetos astronômicos.

Como já vimos, o deslocamento para o vermelho de linhas espectrais pela ação da gravidade – predito por Einstein em 1911 – também não havia sido medido de forma conclusiva até a década de 1960. Em 1917 havia sido anunciado que tal deslocamento não tinha sido observado no espectro do Sol e, em 1918, que as observações tinham sido inconclusivas. Mas é preciso considerar que a medição do deslocamento espectral no Sol não era uma tarefa trivial. O espectro do Sol sofre o chamado “efeito centro-limbo” pelo qual o efeito Doppler de linhas espectrais – devido aos complexos movimentos turbulentos e convectivos do gás na baixa atmosfera solar – quando visto da Terra aparenta ser menor no bordo do que no centro do disco solar. Isso porque que no bordo esses movimentos são predominantemente transversais à linha de visada. Para contornar essa dificuldade era preciso escolher linhas intensas, com as quais a medição do comprimento de onda pu-

desse ser feita sem ambiguidade. Medidas confiáveis só começaram a ser obtidas a partir da década de 1960 não se observando linhas do espectro do Sol, mas de anãs brancas cuja gravidade na superfície é muito mais intensa. Na mesma década o efeito foi confirmado num experimento terrestre, com a variação da gravidade numa diferença de altura de apenas 23m. Obviamente foi utilizada uma linha espectral especial. Hoje em dia esse efeito não pode deixar de ser levado em conta no sistema de posicionamento global (GPS), a fim de que opere corretamente. Só então todos os testes clássicos da Relatividade Geral foram definitivamente confirmados.

EXPEDIÇÃO NORTE-AMERICANA

Essa expedição era composta por Daniel M. Wise, líder, e seu assistente Andrew Thomson. O primeiro também era amante da fotografia, por isso deixou muitos e bons registros iconográficos dessa viagem, alguns aproveitados aqui. Os dois partiram de Nova Iorque e chegaram a Recife em 25 de março de 1919. Daí seguiram em embarcação do Lloyd Brasileiro para Fortaleza, onde aguardaram a chegada da expedição brasileira. As duas expedições seguiram juntas de vapor para Camocim, onde chegaram no dia 7 de maio, e dois dias depois seguiram de trem para Sobral.

No porão da casa em que ficaram hospedados, a 5m de profundidade, foram instalados os aparelhos para medição do magnetismo terrestre: magnetógrafo e variômetros, que foram operados por Wise (figura 23).

Os instrumentos para a medição da eletricidade atmosférica – medidor do gradiente do potencial elétrico (figura 24) e da condutividade elétrica (figura 25) – operados por Thomson, foram instalados na pista de corridas do *Jockey Club* em frente à casa do Cel. Saboya, onde estavam instalados também os instrumentos da expedição britânica.

Após o eclipse, a equipe americana permaneceu mais alguns dias em Sobral fazendo medições. Wise e Thomson estariam de volta a Washington em agosto, depois de coletarem mais dados em Camocim, em localidades do Pará, em Cabedelo (PB) e em locais de Pernambuco.

Figura 23. Aparelhos para medição do magnetismo terrestre no porão da casa do Cel. Saboya. Fonte: Figura 4 de <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0092>



Figura 24. À esquerda um auxiliar local junto ao aparelho de medir o gradiente do potencial elétrico. À direita o sensor e atrás Thomson (de chapéu). Fonte: Figura 7 de <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0092>



Figura 25. Medidor da condutividade elétrica no abrigo. Thomson (sentado) e um auxiliar local (de pé). Fonte: Figura 6 de <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0092>



NASCIMENTO DO GEOMAGNETISMO

A expedição – enviada pelo *Department of Terrestrial Magnetism (DTM)* da *Carnegie Institution* de Washington – tinha por objetivo medir o impacto do eclipse no campo magnético da Terra, na eletricidade atmosférica e nas correntes telúricas (correntes elétricas que fluem na crosta terrestre). Sabidamente variações magnéticas induzem variações elétricas e vice-versa, estabelecendo uma complicada retroalimentação. O eclipse era visto como uma oportunidade natural para o estudo das reações elétricas e magnéticas da Terra à breve interrupção da incidência da radiação solar, sobretudo na alta atmosfera. Mas o tópico do magnetismo e da eletricidade terrestre ainda era incipiente e dava os primeiros passos para integrar o que viria a ser a Geofísica: o estudo físico da Terra como um Planeta. Tanto que, no final do século 19 – ampliando a rede de observatórios astronômicos que já vinham cuidando da determinação da hora certa, da longitude e do cálculo das efemérides – houve um surto de criação de observatórios meteorológicos, magnéticos e sismológicos. Esses últimos principalmente em regiões mais afetadas por terremotos. Para o magnetismo terrestre (Geomagnetismo) faltava principalmente uma boa teoria que explicasse sua origem.

Um importante passo no estudo do magnetismo terrestre havia sido dado na viagem de exploração científica do nobre prussiano Alexander von Humboldt (1769-1859), em 1799, às Américas do Sul e Central. Com as observações magnéticas que fez, descobriu que o equador magnético (local em que a agulha da bússola permanece

horizontal) fica deslocado vários graus do equador geográfico, assim como os polos magnéticos em relação aos polos geográficos. Já de volta à Alemanha, Humboldt se dedicou à observação da variação do campo magnético da Terra, interessando-se mais pelas variações irregulares e de curto período, hoje conhecidas como *tempestades magnéticas*. Tais variações, especialmente as mais intensas, geralmente estão associadas às auroras polares. Diferentemente das variações magnéticas correlacionadas à hora local de cada observatório (portanto com a posição do Sol em relação ao horizonte local), as tempestades magnéticas eram observadas simultaneamente por vários observatórios distribuídos no globo. Isso inspirou Humboldt a criar uma rede global de observatórios magnéticos fixos. Seu prestígio era tão grande que conseguiu estabelecer uma rede na Alemanha, Inglaterra, França e Rússia. Pouco depois, graças a seus esforços junto à RS de Londres, mais observatórios foram instalados nas possessões inglesas espalhadas pelo mundo. Nessa época se descobriu que a ocorrência de tempestades magnéticas era correlacionada com o ciclo solar.

Humboldt teve o mérito também de ter atraído o extraordinário gênio alemão da Matemática e da Física Carl Friedrich Gauss (1777-1855) para o estudo do Geomagnetismo. Este construiu um magnetômetro sofisticado e preciso para o Observatório de Göttingen, capaz de medir a intensidade não apenas relativa, mas absoluta do campo magnético. Tendo sido encarregado de compilar e publicar os numerosos dados que recebia da rede de observatórios do mundo todo, resolveu criar uma forma precisa e elegante de descrever o campo magnético

global da Terra, o que tornaria possível analisar quantitativamente sua variação temporal e espacial. Assim, em 1839 Gauss foi pioneiro em utilizar a soma de *esféricos harmônicos*²⁸ para representar o campo magnético na superfície da Terra, originário só de fontes internas à Terra. Pouco depois Gauss reconheceu a existência de fontes externas, estas geralmente de variação temporal bem rápida.

Analisando os dados de que dispunha, Gauss concluiu que a componente de dipolo – como a de um ímã permanente em que o campo emana de dois polos opostos, N e S – é dominante entre 80 e 90%. Gauss indagou se esse campo seria devido ao magnetismo permanente de algum material do interior da Terra, ou à circulação de cargas elétricas de um dado sinal (positivo ou negativo). Só em 1919 o físico irlandês Joseph Larmor (1857-1942) proporia o mecanismo do *dínamo magnético* para a origem do campo magnético da Terra. Nesse mecanismo, a circulação de ferro e níquel fundidos formando um líquido eletricamente condutor, daria origem ao campo magnético. Muita elaboração ainda seria necessária para a formalização matemática do *dínamo magnético*.

28 Façamos uma analogia: o som de um instrumento musical pode ser representado pela soma de vibrações de várias frequências, sendo que a contribuição de cada frequência precisa ser devidamente dosada. Matematicamente a vibração pode ser representada pela conhecida função *seno*. Esta já envolve a frequência, assim como a amplitude da vibração. O ajuste da contribuição de cada frequência é feito variando-se a amplitude. Analogamente, uma soma de esféricos harmônicos com amplitudes corretamente ajustadas é capaz de representar matematicamente o campo geomagnético na superfície da Terra.

DTM / CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

A DTM da *Carnegie Institution of Washington* (atualmente *Carnegie Institution for Science*) passou a existir em 1904 tendo Louis A. Bauer (1865-1932) como seu primeiro diretor, até 1929. Quando voltou aos Estados Unidos – tendo se doutorado em 1895 em Berlim, defendendo uma tese pioneira sobre a *variação secular* (variação lenta, de longo prazo) do campo geomagnético –, Bauer se imbuíu da missão de promover o Geomagnetismo como um campo científico, ao lado da Astronomia e da Meteorologia. Como diretor da DTM, dedicou-se ao ambicioso projeto de um levantamento global do campo magnético na terra e no mar. Para o levantamento no mar, em 1905 ele fretou o veleiro bergantim *Galilee*, que fazia observações na linha São Francisco-Taiti. Mas como não foi possível substituir itens dessa embarcação que afetavam as medições magnéticas, em 1909 teve início a construção de um novo veleiro, desta vez virtualmente sem material magnético, o *Carnegie*. Este veleiro realizou medições até 1927 em sete cruzeiros pelo globo.

Em terra firme um enorme esforço foi feito para a implantação de novas estações magnéticas por todo o globo. Prova disso é que em cerca de 20 anos foram implantadas mais de quatro mil estações, tanto que em 1929 foi declarado que esse trabalho tinha sido praticamente completado na maior parte da Terra, graças à dedicação e direção enérgica de Bauer.

Bauer teve a sorte de contar com o patrocínio do escocês Andrew Carnegie (1835-1919) que, depois de expandir a indústria americana

do aço no final do século 19 e se tornar muito rico, decidiu ser ele mesmo um filantropo e promotor do filantropismo – tradição que sobrevive até hoje na sociedade americana. Além de inúmeras bibliotecas, escolas e auditórios, Carnegie implantou mais de vinte instituições, sendo a *Carnegie Institution for Science* de Washington – fundada em 1902 para promover a pesquisa, a descoberta e a aplicação do conhecimento para o desenvolvimento social – apenas uma delas à qual a DTM viria a se subordinar. Escapando da rigidez acadêmica, a DTM podia se arriscar mais na fronteira do conhecimento, por exemplo, no magnetismo terrestre.

Desde o início do século 20 se suspeitava que – além do campo magnético gerado no interior da Terra e que constituía a componente mais importante – sob a influência da radiação e da atividade solar, anéis de correntes elétricas eram excitados em volta da Terra, assim como possíveis correntes verticais entre a atmosfera e o solo, que causavam perturbações temporárias no campo magnético do planeta.

Às primeiras medições feitas em eclipse objetivando a determinação astronômica dos instantes de contato entre os bordos do Sol e da Lua, foram acrescentadas medições de parâmetros meteorológicos clássicos, tais como pressão, temperatura, velocidade e direção do vento, umidade do ar e incidência de radiação solar. Depois foram introduzidas medições da eletricidade atmosférica de trovões e raios, assim como da condutividade elétrica do ar na atmosfera calma. No início do século 20, a eletricidade atmosférica suscitava interesse científico graças à descoberta recente da radioatividade e de sua ca-

pacidade de *ionizar*²⁹ o ar. Na época já se sabia que uma ionização natural era responsável por uma leve condutividade elétrica do ar, mas a origem da *radiação penetrante* que ionizava o ar mesmo através de camadas de chumbo só seria entendida em 1912, com a descoberta dos *raios cósmicos*. Também os efeitos do Sol na eletricidade da atmosfera terrestre eram parcialmente conhecidos e já tinham se tornado tema de interesse científico, motivando experimentos durante eclipses solares.

OBSERVAÇÕES DO MAGNETISMO E ELETRICIDADE EM ECLIPSES

Desde 1900, mesmo antes de existir a *Carnegie Institution*, Bauer já articulava a primeira rede internacional de observação dos efeitos elétricos e magnéticos decorrentes da interrupção temporária da radiação solar durante eclipses. Isso ele fez no eclipse de 28 de maio de 1900, cuja faixa de totalidade cruzou o sul dos EUA e o norte da África.

29 Um átomo ou uma molécula no estado normal é eletricamente neutro, ou seja, tem prótons e elétrons em igual número. Ionizar é arrancar um ou mais elétrons de um átomo ou molécula. Como consequência, o átomo ou molécula inicialmente neutra passa a ser um íon com uma ou mais cargas positivas, agora não neutralizadas pelos elétrons que foram arrancados. Um gás ionizado difere de um gás formado de átomos e moléculas eletricamente neutros. O primeiro é capaz de conduzir eletricidade, enquanto o último não.

Em 1912, observações da eletricidade atmosférica também foram feitas por uma expedição chilena no eclipse de Passa-Quatro, na Fazenda Boa Vista, a 5km de Cristina – onde se instalou a equipe argentina chefiada por Perrine. Entre 2 e 11 de outubro foram obtidos registros de ondas de rádio, conteúdo radioativo do ar, queda de potencial, condutividade e conteúdo de cargas positivas e negativas. Mas não consta que tenham sido feitas medições do magnetismo terrestre. Os observadores foram o meteorologista, geofísico e etnógrafo berlinense Walter Knoche (1891-1945) e o físico austro-húngaro Jakob Laub (1882-1962). Knoche fazia expedições desde 1908 na América do Sul, mas em 1910 foi encarregado dos serviços meteorológicos e geofísicos do governo do Chile. Em 1937 se estabeleceu na Argentina, onde trabalhou como climatologista até a morte. Já Laub chegou a viajar em 1908 para Berna a fim de conhecer Einstein. Em 1911 emigrou para a Argentina, onde permaneceu até 1947. Aí trabalhou como professor de Geofísica da Universidade de La Plata e também em serviços da diplomacia argentina. Laub escreveu vários trabalhos sobre Relatividade e publicou em coautoria com Einstein entre 1908 e 1909, mas ele tinha trabalhado também em raios catódicos e raios X, o que o credenciaria a participar dessa expedição. A ida ao eclipse ocorreu no período em que Laub estava na Argentina, mas Knoche no Chile. O chefe da expedição era o astrônomo alemão Friedrich W. Ristenpart (1868-1913), diretor do Observatório Nacional do Chile. Apesar da chuva, Ristenpart tentou registrar a radiação solar durante o eclipse com uma célula de selênio.

Medidas meteorológicas e de magnetismo terrestre já haviam sido coletadas por observatórios magnéticos durante o eclipse total de Sol de 21 de agosto de 1914 – o mesmo que Freundlich tentou observar na Crimeia para detectar o *efeito Einstein*. Em um artigo, Bauer incentivava essas observações, já que a faixa de totalidade desse eclipse favorecia observatórios europeus, mas ele se queixava de não estar recebendo muitas adesões.

Já à frente do *DTM*, ele repetiria esse esforço no eclipse de 8 de junho de 1918, que cruzou o continente norte-americano da costa noroeste à costa sudeste. Mas o eclipse de 1919 foi o primeiro após o término da I Guerra e Bauer decidiu que a rede de observação teria estações da própria *DTM* na trajetória da sombra. Foram elas a de Sobral e a do Cabo Palmas, um promontório no sudeste da Libéria, na África Ocidental. Nesta última o próprio Bauer foi fazer as observações com o assistente Harold F. Johnston. Foram obtidas boas medidas magnéticas, mas não de eletricidade atmosférica porque a bateria se descarregou e não foi possível substituí-la. Fora da trajetória da sombra operaram a estação de Puerto Deseado, na Argentina, e de Campo, em Camarões.

RESULTADOS GERAIS

O resultado geral das medições feitas em eclipses era a detecção de um efeito magnético pequeno, porém, apreciável, de caráter similar à variação experimentada num dia solar, diferindo apenas na magnitude.

De forma meramente qualitativa, mas de acordo com observações contemporâneas, a ideia é de que quando a radiação solar é bloqueada no eclipse, a ionização é interrompida na ionosfera. Consequentemente diminui a condutividade elétrica. Um decréscimo ocorre então no campo geomagnético, devido à redução da corrente de anel na ionosfera.

A redução da temperatura do ar também afeta o campo elétrico (gradiente do potencial elétrico) perto do solo, o que seria esperado devido à redução do transporte turbulento de cargas espaciais. Mas ainda não foi possível confirmar esse resultado sem ambiguidade, porque as flutuações do gradiente do potencial e da corrente ar-terra durante o eclipse e antes e depois do eclipse são comparáveis.

A esses esforços pioneiros de Bauer se somaram fatos novos como a descoberta da ionosfera. Embora Gauss já tivesse postulado a existência de uma camada da alta atmosfera que fosse eletricamente condutora para explicar as variações magnéticas de curto prazo, as primeiras evidências da existência da ionosfera começaram a surgir em 1902. Foi aí que o italiano Guglielmo Marconi (1874-1937) conseguiu fazer a transmissão intercontinental de sinais de rádio de 500 kHz que seguia a curvatura da Terra, o que só seria possível se a Terra tivesse na atmosfera uma camada refletora

de ondas de rádio – a ionosfera, além do solo e da superfície oceânica também refletoras³⁰.

Em seguida se descobriu que em ondas curtas (3-30 MHz) as ondas de rádio podiam se propagar para todo o globo por reflexões na ionosfera, embora essas transmissões dependessem da hora do dia e da atividade solar. Isso abriu uma nova possibilidade de estudar a relação entre a ionosfera e a atividade solar. Hoje, com os avanços da engenharia espacial, ganharam relevância questões da preservação de astronautas no espaço; de instrumentos de satélites contra danos por partículas de alta energia provenientes da atividade solar; da perda de altitude de satélites de baixas órbitas pelo arrasto atmosférico que aumenta com a atividade solar; da intermitência na transmissão de sinais por satélites; da instabilidade na comunicação terrestre de longa distância; da preservação da integridade física dos passageiros de voos comerciais; do colapso de redes de energia em tempestades magnéticas intensas, etc. O estudo das relações solares-terrestres hoje foi incorporado na disciplina chamada Clima Espacial.

Se Larmor propôs em 1919 a teoria do dínamo, o alemão Walter M. Elsasser (1904-1991) foi o autor da teoria atualmente aceita do dínamo autossustentado para explicar o magnetismo terrestre. Ele propôs que o movimento de circulação e de convecção (subida de células de fluido, como ocorre com os balões de ar aquecido) de um

30 Isso curiosamente teria atrasado o início das observações radioastronômicas, pois achava-se que sinais de rádio cósmicos jamais pudessem chegar à superfície da Terra.

fluido condutor (ferro e níquel fundido) do núcleo externo da Terra induzia correntes elétricas que geravam o campo magnético do planeta. O modelo matemático combinava equações da já citada Magnetohidrodinâmica. As equações que descrevem situações realistas são muito complexas e soluções numéricas para a Terra (e também para o Sol) só puderam ser obtidas a partir do final do século passado, com o advento de supercomputadores. Assim a teoria do dínamo magnético conquistou credibilidade.

MARTIN MAKLER

A RELATIVIDADE

O IMPACTO DA
RELATIVIDADE GERAL:
DO DESVIO DA LUZ
ÀS DESCOBERTAS DO
SÉCULO XXI

A comprovação do desvio da luz, conforme a previsão de Albert Einstein, tornou a teoria da relatividade geral amplamente aceita na comunidade científica. Muito além de uma teoria da gravitação, a relatividade geral revolucionou o conceito de espaço e de tempo, já intimamente conectados desde a relatividade especial, formulada uma década antes, em 1905, também por Einstein. O espaço com suas 3 dimensões (“altura, comprimento, largura”), juntamente com o tempo, unidimensional (uma reta), já tinha passado a formar uma entidade de 4 dimensões, o chamado espaço-tempo.

Fac-símile do *Illustrated London News* do 22 de novembro de 1919 que contém um infográfico da observação do eclipse solar realizada pelos astrônomos Crommelin e Davidson em Sobral. No painel circular a explicação do fenômeno: a mudança de posição aparente de algumas estrelas do aglomerado das Hyades que estariam no campo visual do Sol no momento do maior contato do eclipse, devido à curvatura induzida pela presença do astro no campo. A apresentação dos resultados da missão foi em 6 de novembro em uma solene reunião da *Royal Society of London* e da *Royal Astronomical Society*.
Fonte: Acervo fotográfico do MAST

DRAWN BY W. D. ROBINSON, FROM MATERIAL SUPPLIED BY DR. CROMMELIN.



THE CURVATURE OF LIGHT: EVIDENCE FROM BRITISH OBSERVERS' PHOTOGRAPHS AT THE ECLIPSE OF THE SUN.

The results obtained by the British expeditions to observe the total eclipse of the sun last May verified Professor Einstein's theory that light is subject to gravitation. Writing in our issue of November 15, Dr. A. C. Crommelin, one of the British observers, said: "The eclipse was specially favourable for the purpose, there being no fewer than twelve fairly bright stars near the limb of the sun. The process of observation consisted in taking photographs of these stars during totality, and comparing them with other plates of the

same region taken when the sun was not in the neighbourhood. Thus if the starlight is bent by the sun's attraction, the stars on the eclipse plates would seem to be pushed outward compared with those on the other plates. . . . The second Sobral camera and the one used at Principe agree in supporting Einstein's theory. . . . It is of profound philosophical interest. Straight lines in Einstein's space cannot exist: they are pairs of opposite curves. . . . The light is bent in the field of the sun and a star.

Experiência imersiva na linguagem da teoria da relatividade de Einstein, disposta na terceira sala da exposição *O Eclipse*.

São mostradas algumas relações matemáticas ligadas à teoria da relatividade restrita (TRR) e geral (TGR) de Einstein.

A quantidade G mostrada com sub-índices na forma de letras gregas é conhecida como tensor de Einstein, representa uma matriz de funções com significado

geométrico, relacionada à curvatura do espaço-tempo. A quantidade T representa o conteúdo de matéria-energia.

A célebre equação

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

pode ser lida como:

"a matéria diz ao espaço como se curvar".

Fonte: Acervo de imagens do MAST

$$E=mc^2$$

$$R = \frac{D}{2} R + D\Lambda = \frac{8\pi G T}{c^4}$$

$$\det(g) = \frac{1}{H} \epsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} \epsilon^{\mu\nu\lambda\rho} g_{\alpha\kappa} g_{\beta\lambda} g_{\gamma\mu} g_{\delta\nu}$$

$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$R = \frac{D}{2} R + D\Lambda = \frac{8\pi G T}{c^4}$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$T = 0$$

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$R^\alpha - \frac{1}{2} R g^{\alpha\beta} + \Lambda g^{\alpha\beta} = \frac{8\pi G}{c^4 \mu_0} \left(F^\alpha{}_\psi F^\psi{}_\beta - \right.$$

$$\frac{8\pi G}{c^4 \mu_0} \left(F^{\alpha\psi} F_\psi{}^\beta + \frac{1}{4} g^{\alpha\beta} F_\psi{}^\psi F_\psi{}^\psi \right)$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial A_\mu}{\partial x^\nu} - \frac{\partial A_\nu}{\partial x^\mu} \right)$$

$$mc \frac{dt}{d\tau}$$

$$mc^2 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

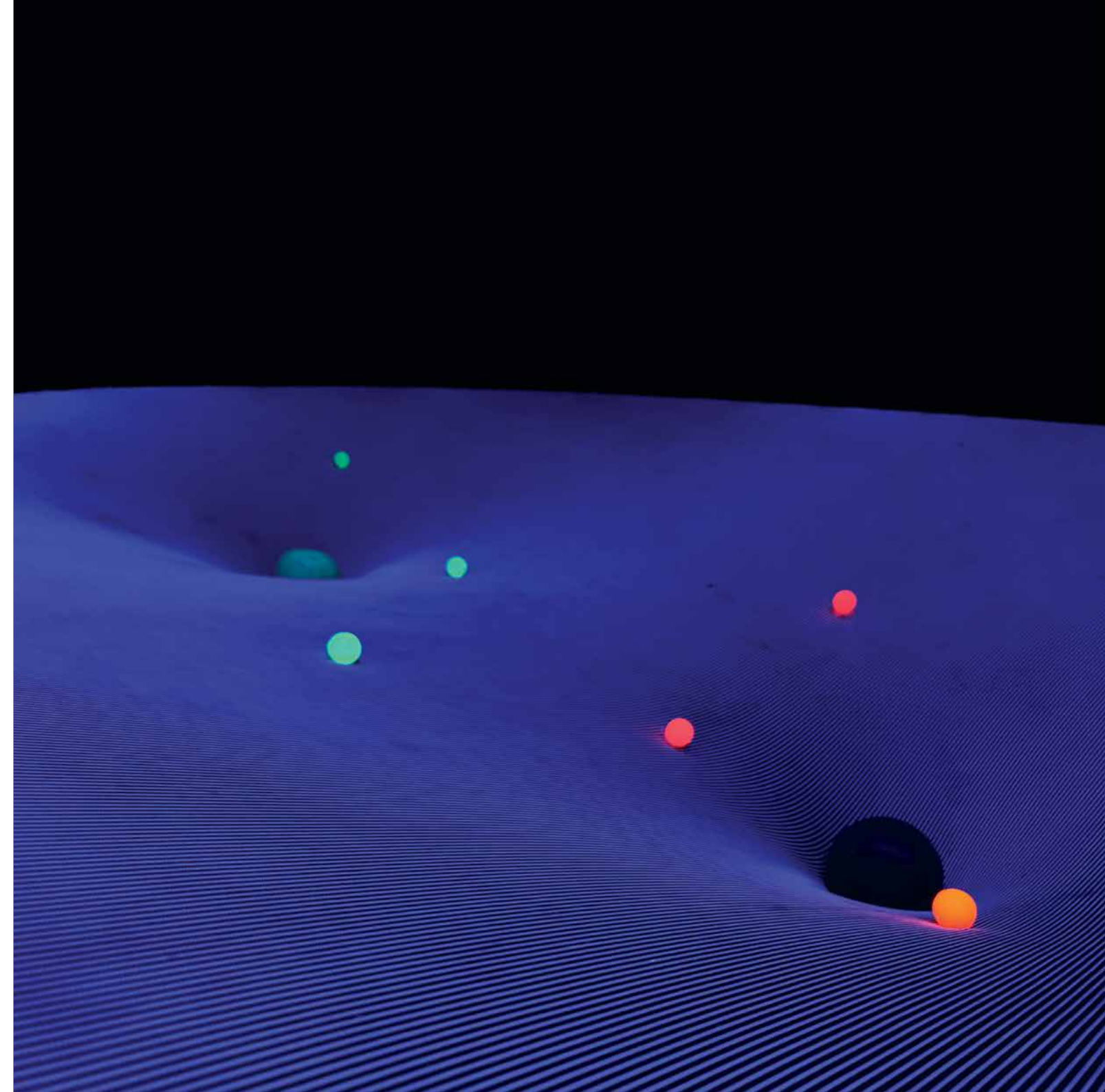
$$= \frac{D}{2} R + D = \frac{8\pi G T}{c^4}$$

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

A relatividade geral concedeu uma natureza dinâmica a esse espaço-tempo. Ou seja, mais do que uma arena onde ocorrem os acontecimentos, o espaço-tempo passa a ser uma entidade que se relaciona com a matéria, é modificada por ela e a ela modifica. Esse conceito de um espaço-tempo maleável às vezes é expresso como “tecido do espaço-tempo”.

Inclusive, é possível se fazer uma analogia visual entre o espaço curvo, reduzido a duas dimensões por simplicidade, com um tecido esticado. Sem nenhuma massa sobre ele o tecido fica plano e objetos leves que se deslocam sobre ele fazem trajetórias retas. Já se colocamos um objeto pesado sobre o tecido, ele se deforma. Bolinhas jogadas sobre ele farão trajetórias curvas, podendo inclusive fazer órbitas fechadas. Assim, o movimento de um corpo devido à gravitação é uma consequência direta da curvatura do espaço. Dito de outra forma, parafraseando o célebre físico John Wheeler: “a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar e o espaço-tempo diz à matéria como se mover”.

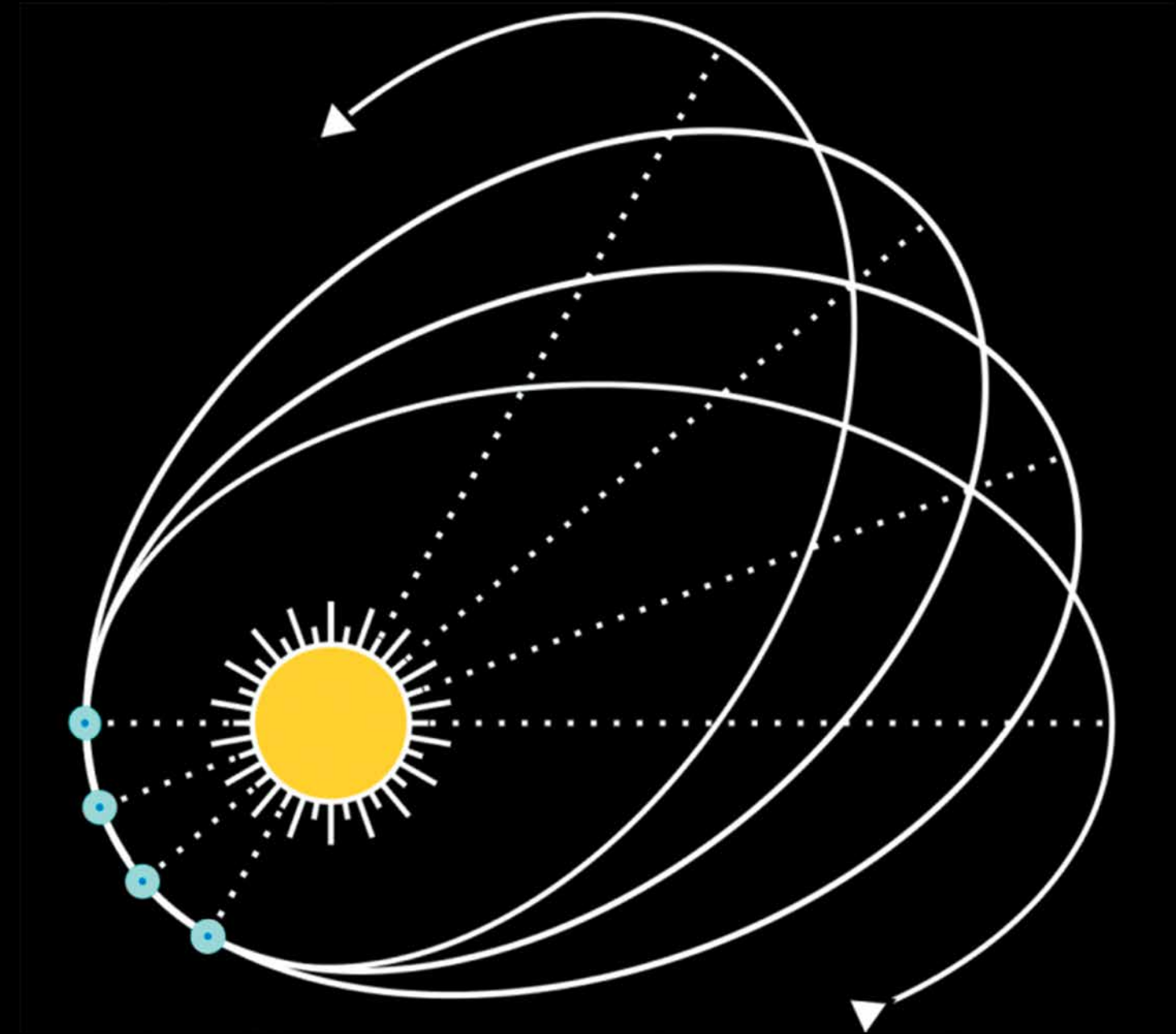
Bancada interativa sobre a curvatura do espaço-tempo, disposta na terceira sala da exposição *O Eclipse do MAST*. Uma membrana elástica é deformada pela massa central, o que obriga a que qualquer deslocamento no entorno da massa central seja determinado pela geometria deformada do tecido, em analogia com o que acontece com grandes concentrações de matéria como galáxias, estrelas e planetas: “o espaço-tempo diz à matéria como se mover”.
Fonte: Acervo de imagens do MAST



Além de modificar completamente o arcabouço conceitual e matemático da física, a teoria da relatividade geral previu diversos fenômenos totalmente novos, alguns com implicações práticas no nosso dia a dia e outros que só foram comprovados um século depois da formulação dessa teoria. Se bem a relatividade geral ajudou a inaugurar a nova física do século XX e se consolidou durante esse século, podemos dizer que o século XXI é o século dessa teoria, pois é durante esse período que suas consequências mais fortes afloraram de forma mais contundente.

Um dos primeiros testes da Teoria da Relatividade Geral, proposto pelo próprio Einstein em 1915, mostrava sucesso ao calcular o avanço angular do periélio de Mercúrio (pontos azuis da figura), descoberto por Le Verrier em 1859. Einstein consegue calcular com sua teoria a contribuição que faltava para explicar o valor de 43" (segundos de arco) por século que era observado. Em consequência, o fenômeno pode ser entendido considerando a deformação espaço-temporal causada pela massa do Sol, levando em conta seu efeito no movimento do planeta mais próximo da estrela.

Fonte: https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Precess%C3%A3o_do_peri%C3%A9lio.svg

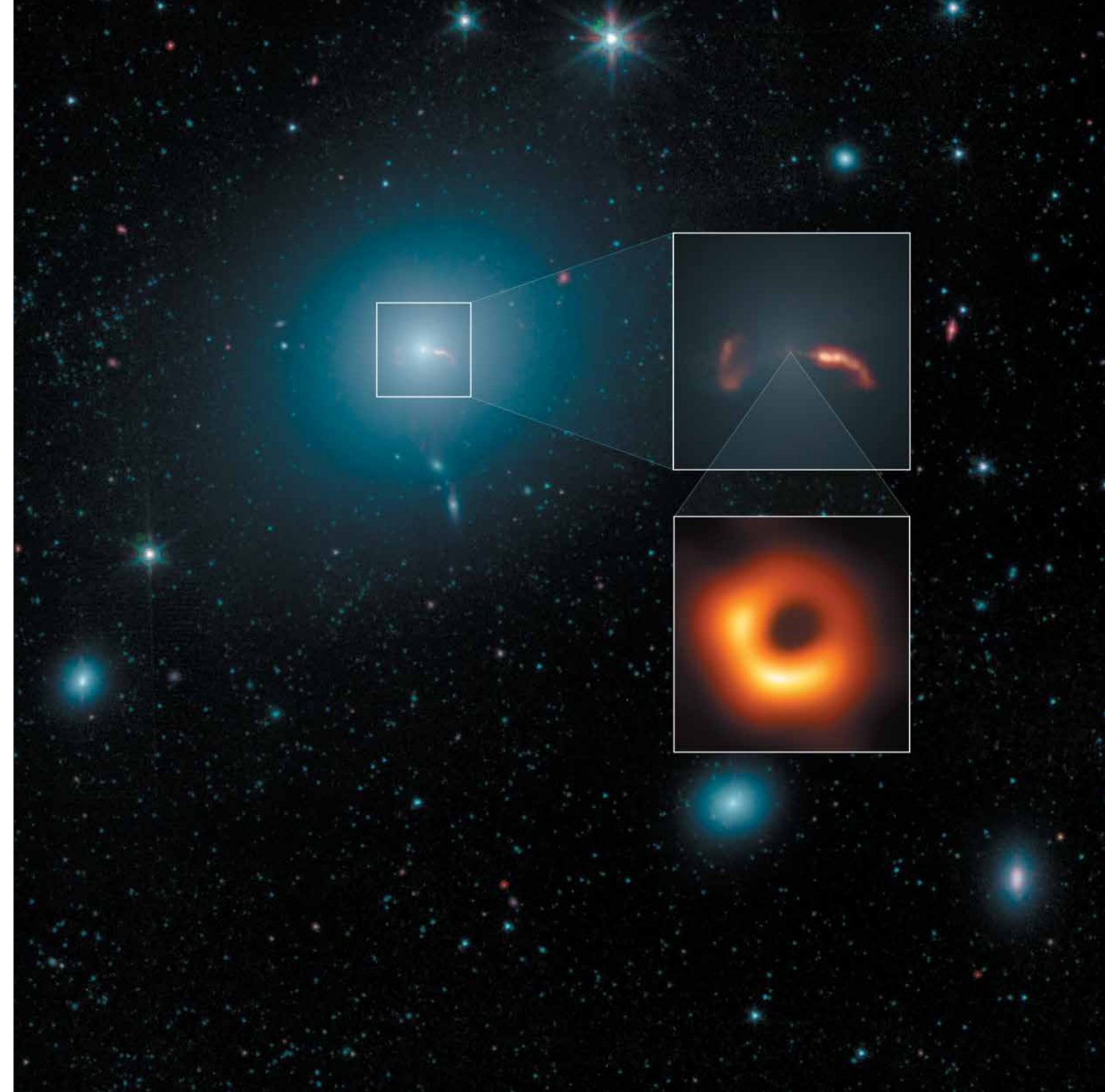


Talvez a consequência mais chocante da teoria da gravitação de Einstein seja a previsão, obtida no ano seguinte a sua formulação, da existência dos buracos negros. Durante muito tempo pensou-se que esses objetos fossem apenas uma curiosidade, uma abstração matemática dessa teoria e que talvez apontassem até uma limitação da sua validade. O buraco negro não é apenas um objeto do qual nem a luz nem nada pode sair, mas é um lugar onde o espaço-tempo se comporta de forma diferente de qualquer concepção intuitiva nossa.

Embora esquisitos e misteriosos esses objetos foram sendo aceitos devido a diversas observações astronômicas que mostram evidências indiretas para sua existência. Além disso, os modelos físicos da evolução estelar preveem que os buracos negros sejam o estágio final da vida de estrelas com massa muito elevada. Existiriam ainda buracos negros com massas com cerca de milhões a bilhões de vezes a massa do Sol, os chamados buracos negros supermassivos. Estes residiriam no centro de grande parte das galáxias.

Uma das evidências mais diretas para a existência dos buracos negros é o aparecimento de um “anel de luz” ao seu redor, devido exatamente à deflexão da luz por seu campo gravitacional. Cem anos após o eclipse de Sobral, em 10 de abril de 2019, foi divulgada a primeira imagem desse anel, obtida através da combinação da informação de radiotelescópios espalhados pelo globo terrestre. Trata-se do buraco negro supermassivo no centro da galáxia elíptica conhecida como M87 e essa imagem ficou conhecida como a primeira “foto” de um buraco negro.

Imagem de galáxia elíptica M87, localizada a 55 milhões de anos-luz da Terra. Na maior ampliação da região central da galáxia é possível ver o chamado “anel de luz”, uma imagem reconstituída pelo projeto Event Horizon Telescope, que é considerada a primeira imagem de um buraco negro. As observações feitas em 2017, contando com 8 radiotelescópios distribuídos ao redor do mundo, usaram a técnica de interferometria de longa linha de base, o que permitiu reproduzir a capacidade de um telescópio cuja abertura seria praticamente do tamanho da Terra. O buraco negro do núcleo de M87 tem uma massa de 6,5 bilhões de massas solares e possui rotação. Fonte: https://photojournal.jpl.nasa.gov/figures/PIA23122_fig2.jpg

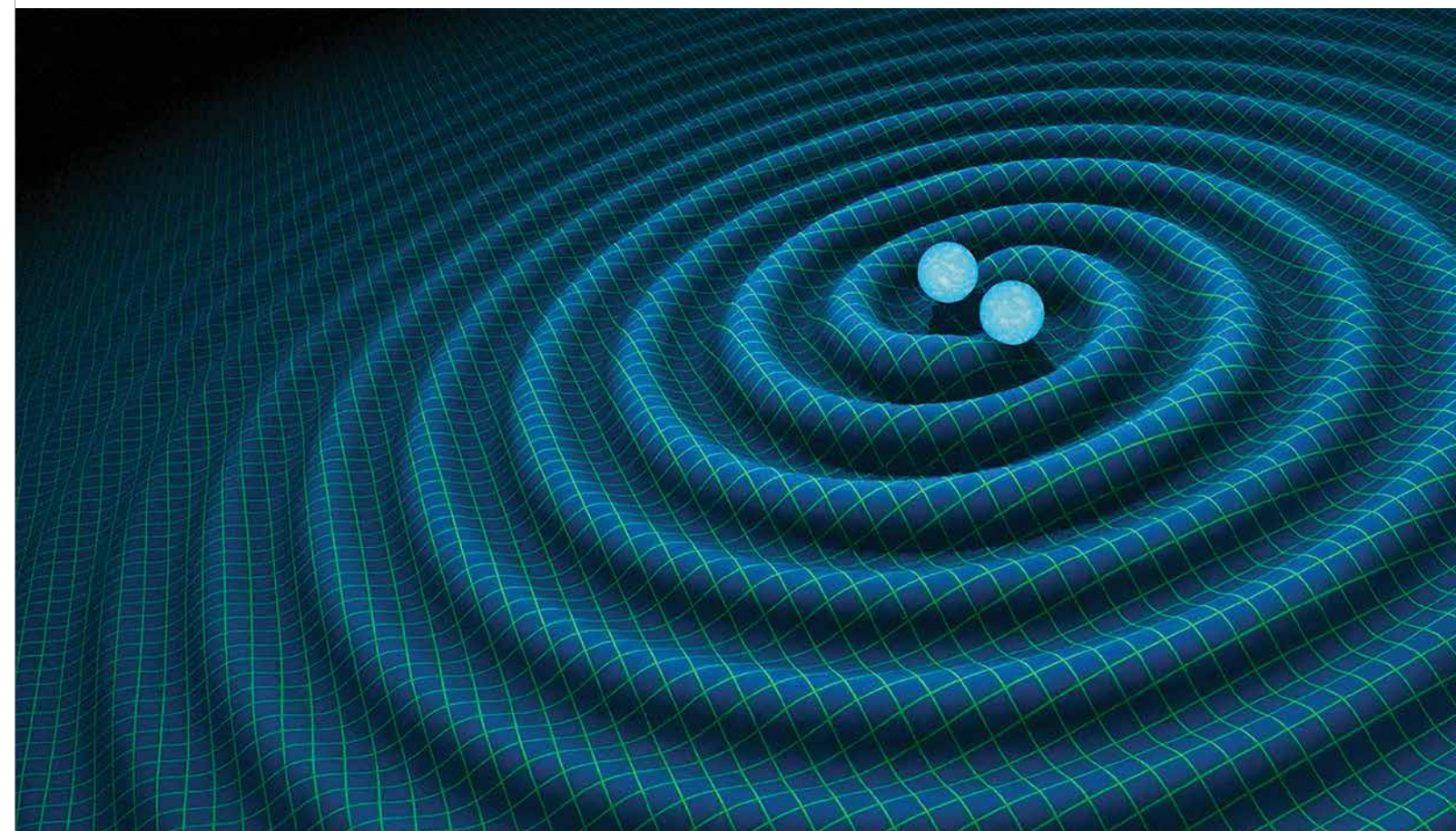


Outra previsão emblemática e peculiar da relatividade geral é a existência das ondas gravitacionais. Essas ondas se assemelham às ondas se propagando na superfície da água ou em um tecido, porém é o próprio espaço-tempo que oscila! Einstein mesmo chegou a duvidar de sua existência e foram necessários 100 anos após a relatividade geral até que elas fossem descobertas. As ondas gravitacionais são geradas por eventos muito energéticos no Universo, como, por exemplo, a colisão de buracos negros. As oscilações do espaço-tempo são tão tênues, que ao chegar na Terra provocam uma ínfima variação de tamanho das coisas, em cerca de uma parte em mil trilhões de trilhões!

Concepção artística da interação entre dois objetos compactos distantes, gerando um padrão ondulatório no espaço-tempo.

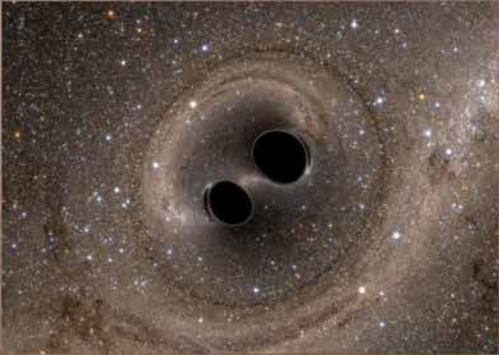
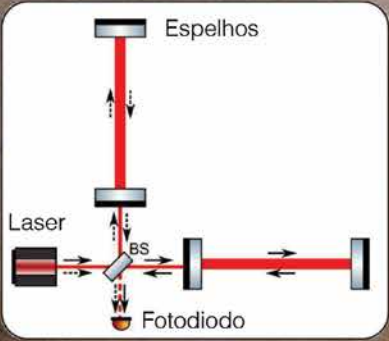
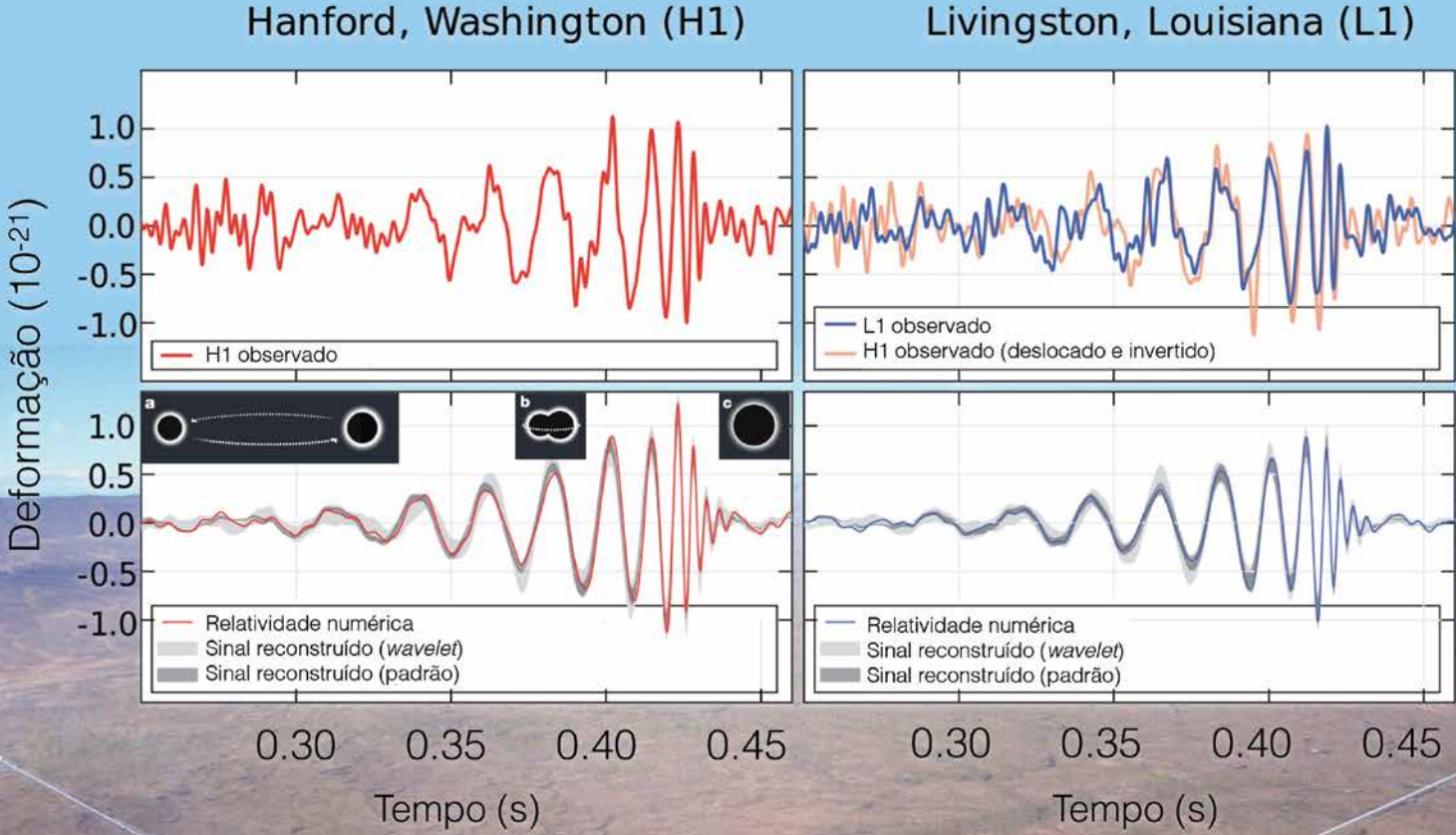
Essas ondas são previstas na teoria de relatividade geral e foram detectadas pela primeira vez em 2015.

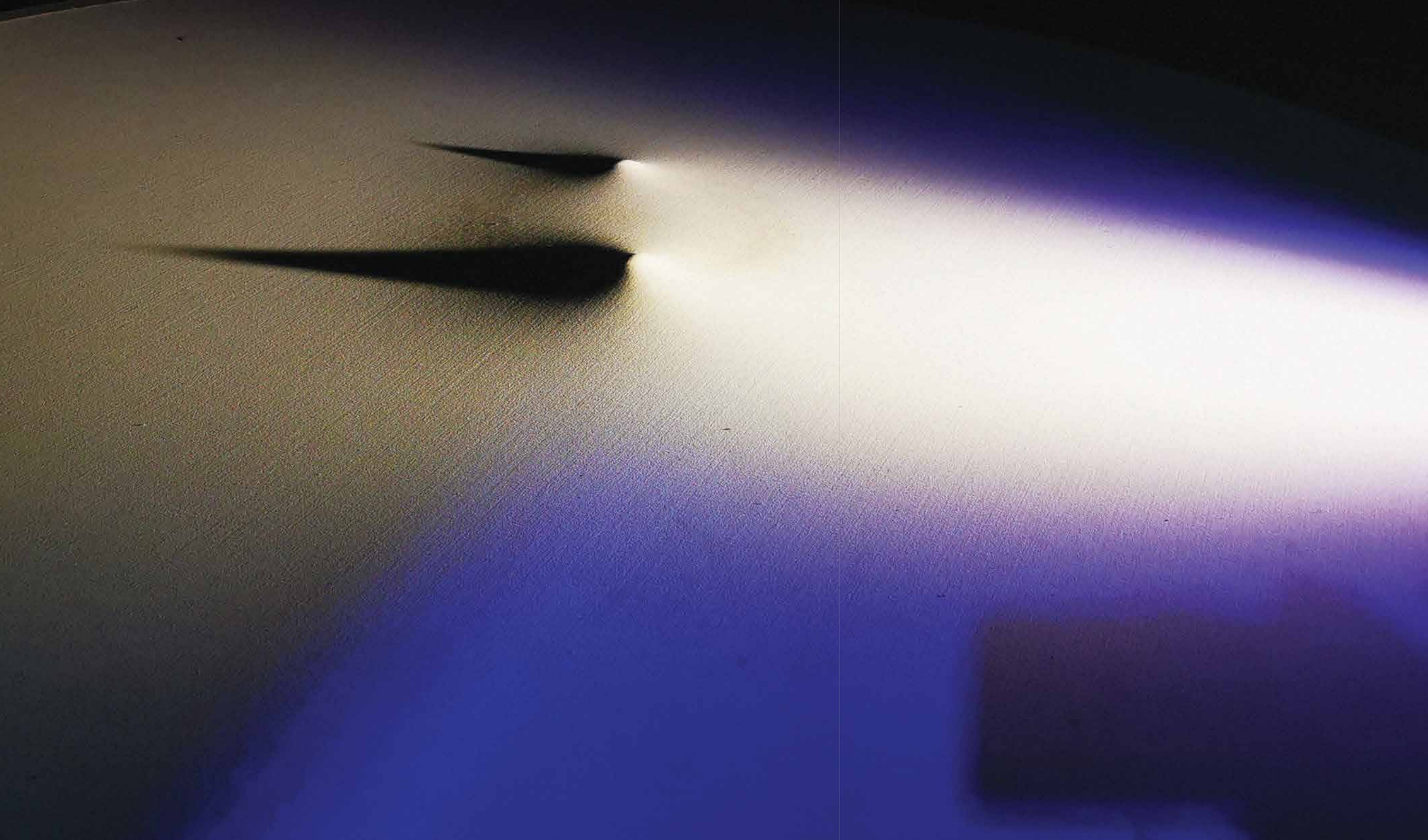
Fonte: NASA
[<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2016/nsf-sligo-has-detected-gravitational-waves>]



A primeira onda gravitacional foi descoberta em 14 de setembro de 2015 pelo observatório *LIGO* (sigla para *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, <https://www.ligo.caltech.edu/>). O *LIGO* possui espelhos com separação de 4km entre eles e mede oscilações equivalentes a um milésimo do tamanho de um próton nesse tamanho, provavelmente a medida mais precisa já feita. A descoberta das ondas gravitacionais reforçou a validade da teoria da relatividade geral e, de quebra, comprovou a existência dos buracos negros, já que esse primeiro evento correspondeu à fusão de dois buracos negros que orbitavam um ao outro. Essa medida abriu uma janela inteiramente nova para nosso conhecimento do Universo, já que pela primeira vez na história da humanidade conseguimos captar informações transmitidas pela própria oscilação do espaço-tempo. O *LIGO* passou a detectar dezenas de colisões de buracos negros e a ele se juntou outro observatório de ondas gravitacionais, o projeto *Virgo* (<https://www.virgo-gw.eu/>). Em 17 agosto de 2017 foi detectada por esses observatórios, pela primeira vez, uma onda gerada pela colisão de duas estrelas de nêutrons, objetos extremamente compactos que também são um dos possíveis estágios finais da vida das estrelas.

Primeira detecção de uma onda gravitacional. As ínfimas deformações no espaço causadas pela onda gravitacional são detectadas por um interferômetro (ilustração abaixo à esquerda), fornecendo o padrão temporal mostrado nos gráficos. As medidas realizadas com dois interferômetros (H1 e L1), separados de 3.000 Km, mostram um padrão semelhante, conforme previsto pela teoria da relatividade geral nas fases da coalescência de dois buracos negros: (a) espiralamento, (b) fusão e (c) toque final. A figura abaixo à direita é uma ilustração artística dos buracos negros em fusão, na frente de um fundo de estrelas. A imagem de fundo mostra uma vista aérea do interferômetro do LIGO situado em Hanford. Créditos: Abbott et al., LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, Physical Review Letters, Caltech, MIT, NSF, SXS, Gräf et al.]

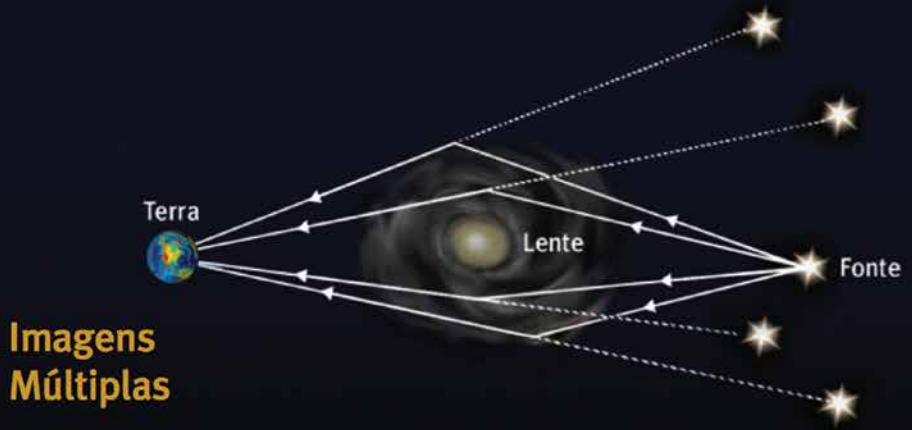




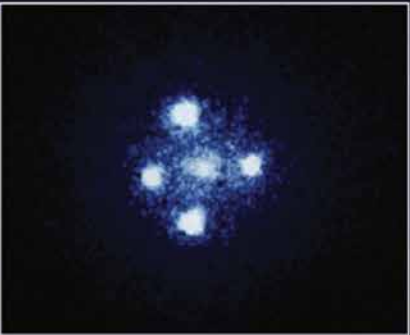
Simulação da produção de ondas gravitacionais, disponível na terceira sala da exposição *O Eclipse*. Um tecido é esticado em uma bancada circular, sobre um par de objetos unidos por um eixo. Quando esse eixo gira, cria-se um padrão sobre o tecido que imita visualmente as distorções do espaço-tempo propagando-se em uma onda gravitacional.
Fonte: Acervo fotográfico do MAST

A consequência mais direta, e talvez mais bela, da deflexão da luz pela gravidade é a existência das lentes gravitacionais. A trajetória da luz vinda de objetos celestes distantes é desviada pelo campo gravitacional de objetos mais próximos. Assim, as imagens desses objetos distantes podem aparecer distorcidas. O mais surpreendente é que a luz pode percorrer caminhos totalmente distintos até chegar à Terra, aparentando, portanto, vir de pontos diferentes do céu. Esse fenômeno, também chamado de miragens gravitacionais, faz com que possamos ver várias imagens distintas de uma mesma fonte de luz.

Ilustração do efeito de lente gravitacional. A deflexão da luz pela gravidade distorce a forma de fontes de luz distantes, podendo gerar imagens em forma de arco ou até mesmo anéis (conhecidos como anéis de Einstein). Além disso, a luz pode percorrer trajetórias diferentes até chegar à Terra, levando à aparição de imagens múltiplas. Nesses casos o corpo que atua como lente gravitacional, distorcendo o espaço-tempo, é geralmente uma galáxia ou um aglomerado de galáxias. Crédito: Revista Ciência Hoje

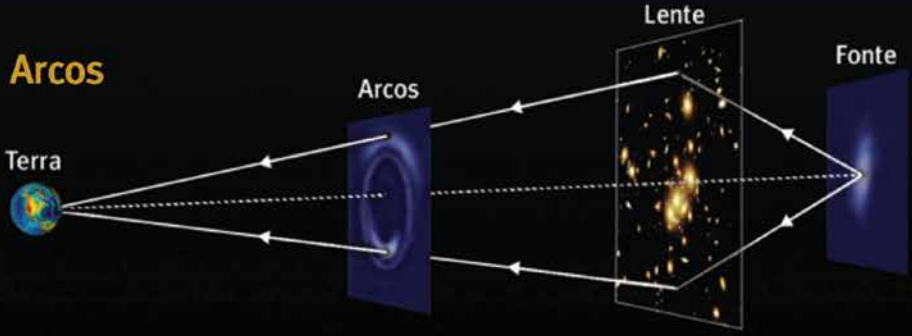


Imagens Múltiplas

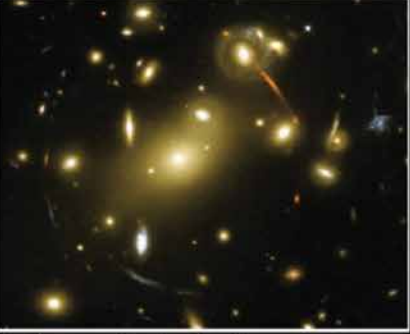


Cruz de Einstein formada por várias imagens de quasar

NASA, ESA, E STSCI



Arcos



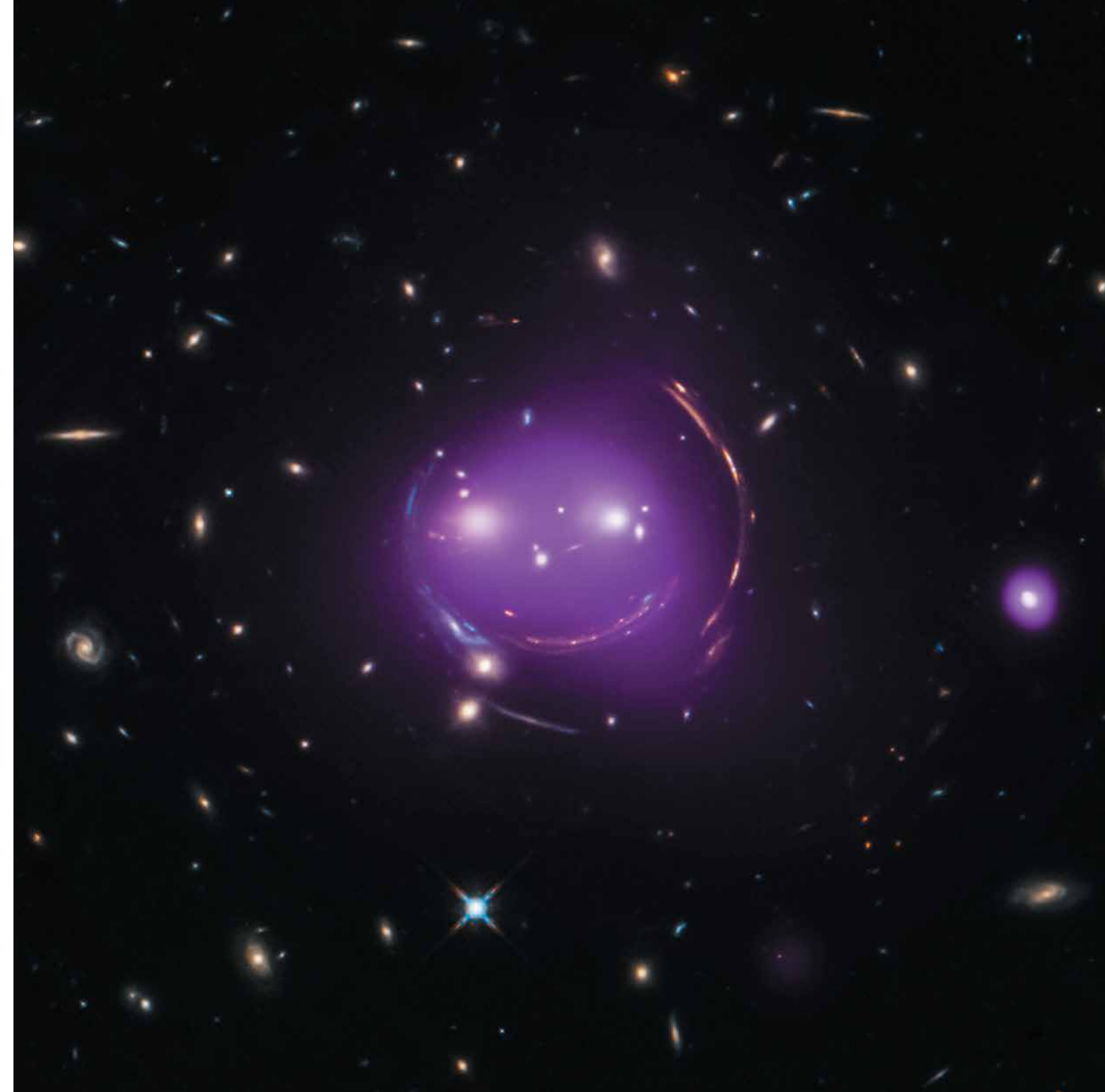
Aglomerado de Abell 2218 com diversos arcos gravitacionais

ANDREW FRUCHTER (STSC) ET AL., WFP-C2, HST, NASA

Além de distorcer e aumentar o tamanho das fontes de luz o fenômeno de lente gravitacional também amplifica a luz desses objetos. O objeto que distorce o espaço-tempo, chamado de lente, pode ser uma galáxia distante ou até mesmo um planeta em nossa galáxia! E os objetos cuja imagem é distorcida, as fontes de luz, podem ser galáxias e quasares distantes ou até mesmo estrelas de nossa galáxia. Além de sua beleza, o efeito de lente é extremamente útil para sondar o Universo e vem sendo cada vez mais utilizado ao longo deste século XXI. A amplificação da luz de algumas estrelas ao longo do tempo permitiu descobrir dezenas de planetas fora de nosso Sistema Solar. Mas é além dos confins de nossa galáxia que esse efeito tem sido mais usado. A principal aplicação é determinar como a matéria se distribui no Universo, desde as galáxias até as maiores estruturas do Cosmos. Usando a forma das galáxias distorcidas e suas imagens múltiplas é possível determinar a quantidade de massa que age como lente.

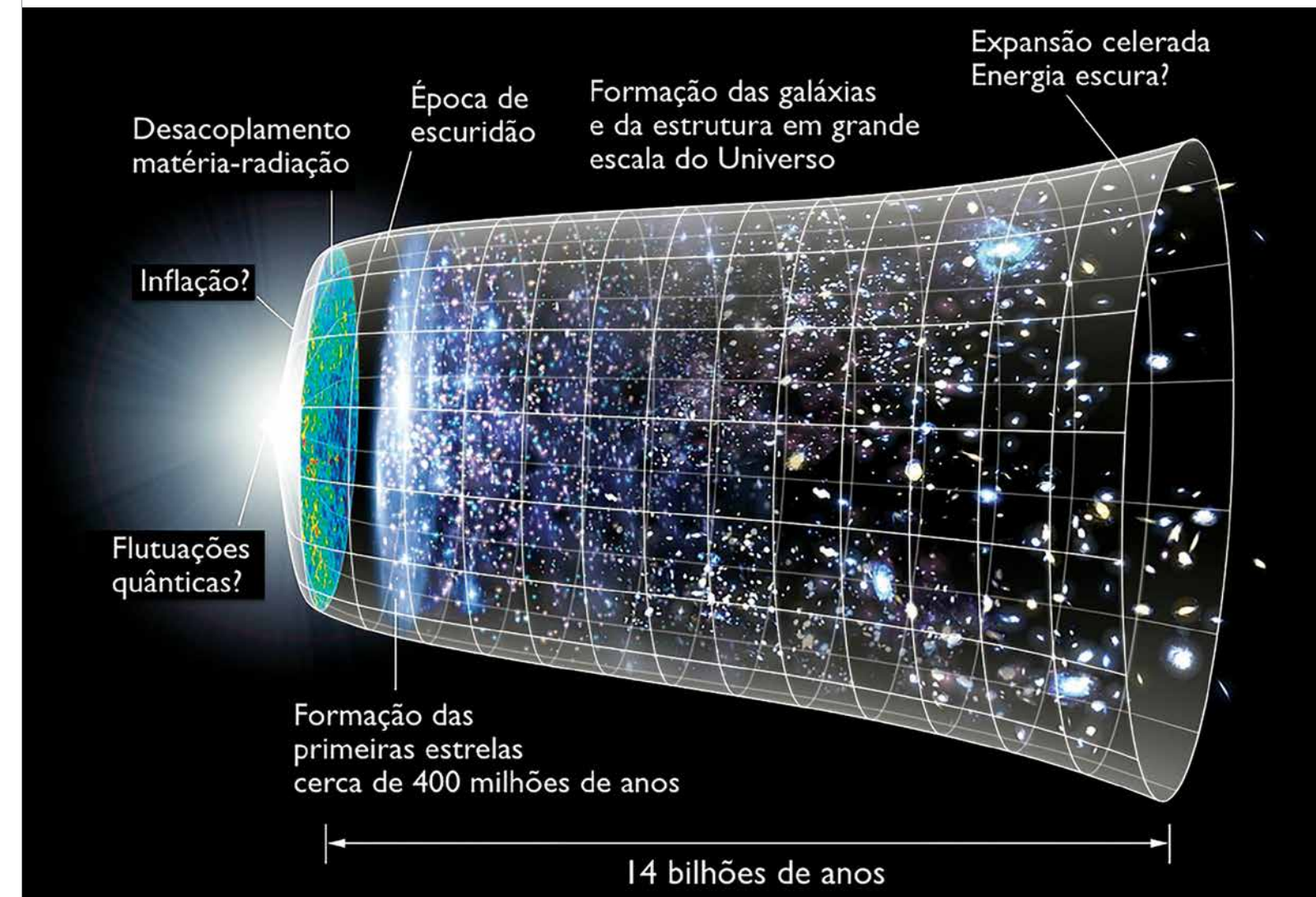
Todas as medidas atuais usando o efeito de lente gravitacional corroboram os resultados obtidos no século passado de que cerca de 80% da matéria do Universo está sob a forma de matéria escura. Segundo os dados cosmológicos, essa matéria, além de completamente invisível, não pode ser composta pela partículas já conhecidas, como prótons, nêutrons e elétrons. Ela deveria consistir de partículas inteiramente novas ou senão estar na forma de buracos negros de massas muito distintas, produzidos em alguma fase primordial do Universo.

Imagem do grupo de galáxias conhecido como Gato de Cheshire (SDSS J103842.59+484917.7) obtida pelo telescópio espacial Hubble. Os objetos em forma arqueada são imagens de galáxias distantes produzidas pelo efeito de lente gravitacional graças à deflexão da luz pelo campo gravitacional do grupo. A parte difusa mostrada com cor roxa corresponde à imagem do mesmo sistema, mas feita em raios-x (ou seja, na região do espectro da luz correspondente aos raios-x), pelo satélite Chandra. Ela mostra que o grupo de galáxias é permeado por um gás extremamente quente e que representa a maior parte da matéria comum no grupo. Tanto o efeito de lente quanto a temperatura do gás evidenciam a presença nesse sistema de uma matéria ainda desconhecida, denominada matéria escura. Fonte: <https://chandra.harvard.edu/photo/2015/cheshirecat/> [crédito HST, Chandra, NASA, ESA]



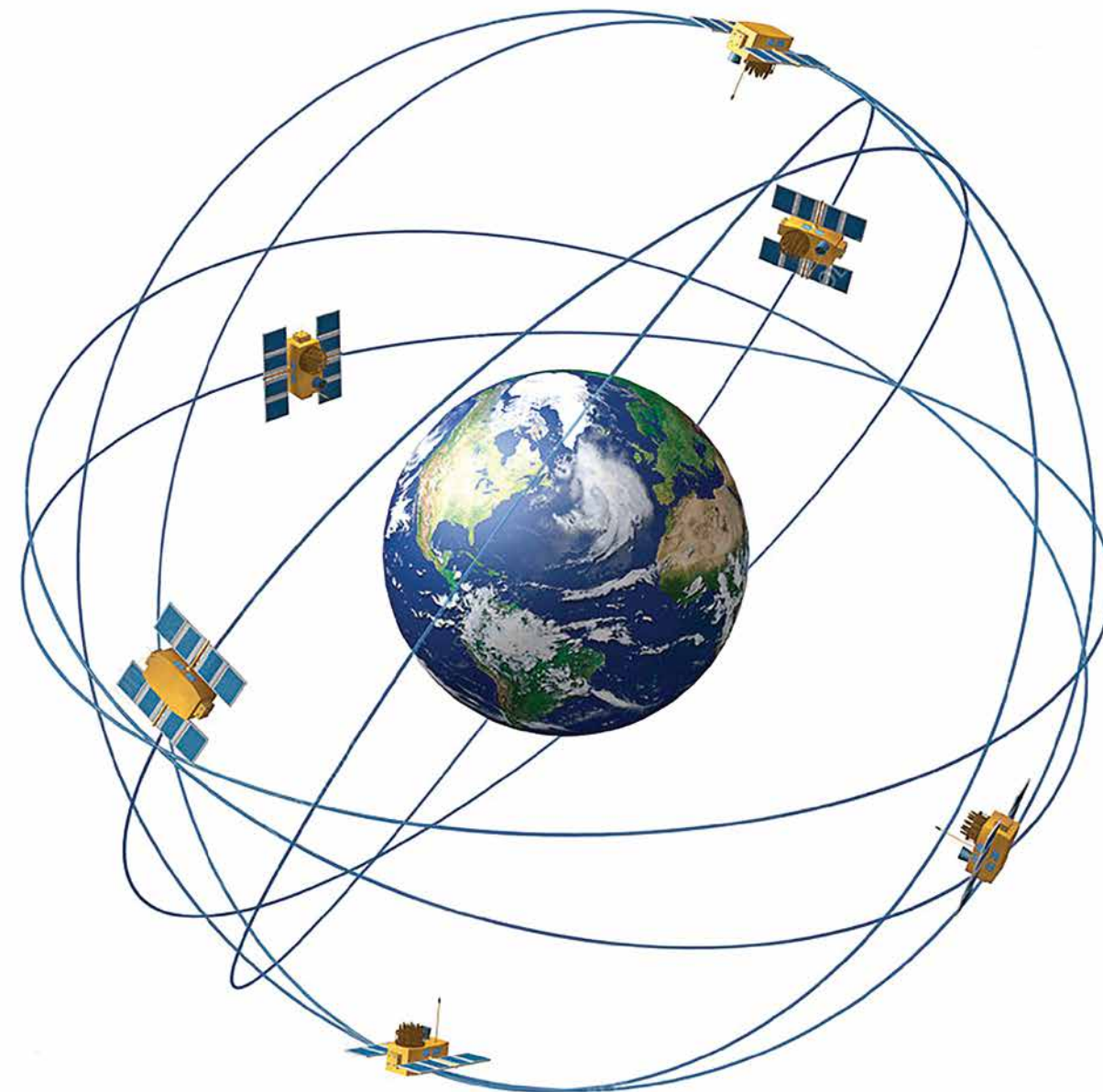
Não bastasse a presença da matéria escura, uma grande diversidade de dados astronômicos indica que a dinâmica do Universo deveria ser dominada por uma segunda componente desconhecida, denominada energia escura. A matéria e a energia escuras estão entre as maiores incógnitas do modelo cosmológico vigente. Elas apontam as limitações das teorias físicas atuais e indicam possíveis caminhos para uma nova física. Apesar dessas grandes incógnitas, é surpreendente que possamos elaborar um modelo físico do Universo, capaz de descrever sua história desde tempos remotos, há cerca de 14 bilhões de anos, até os tempos atuais e sua grande diversidade de estruturas. Essa conquista da espécie humana, que se consolidou durante o século XXI tem, entre seus pilares, a teoria da relatividade geral.

Ilustração da história da expansão do Universo segundo o modelo cosmológico atual, fundamentado nas teorias de física fundamental – incluindo a relatividade geral de Einstein – e em um vasto conjunto de observações astronômicas. Há cerca de 14 bilhões de anos o Universo era extremamente denso e quente, além de opaco. Na medida em que se expande, o Cosmos passa por diversas fases, incluindo o desacoplamento matéria-radiação, quando a luz passa a se propagar livremente. Depois foram formadas as primeiras estrelas e foi sendo montada a estrutura em grande escala do Universo, ao mesmo tempo em que surgiam e evoluíam as galáxias. Atualmente a expansão passa por uma fase acelerada, cuja dinâmica é creditada à energia escura. Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Expansion_of_the_universe#/media/File:CMB_Timeline300_no_WMAP.jpg



Mas não é só para compreender a imensidão do Cosmos que a relatividade geral é importante. Na realidade, a maioria de nós anda com uma “maquina de relatividade geral” em nossos bolsos e nem nos damos conta. Para determinar nossa posição precisa na Terra, o sistema de GPS (de Global Positioning System) compara o tempo de chegada dos sinais de diferentes satélites até o nosso celular. As diferenças de tempo são ínfimas, mas a precisão é tanta que é necessário levar em conta os efeitos da relatividade geral. Segundo essa teoria, o passar do tempo é diferente para objetos em um campo gravitacional e em movimento. Ou seja, o tempo medido pelos satélites do GPS é diferente do medido por nossos relógios, pois aqueles estão em movimento em relação a nós e situados em uma altura muito diferente. Essa variação no tempo é imperceptível na escala humana, mas é absolutamente crucial para calcular nossa posição correta. Se ignorássemos os efeitos da relatividade geral, o GPS nos daria posições completamente erradas, com uma diferença de 10 Km em um único dia e que seria cumulativa. Isso inviabilizaria a entrega e o transporte por aplicativos, o direcionamento correto de ambulâncias e forças de segurança, etc. Em resumo o sistema de GPS só funciona, facilitando imensamente a nossa vida quotidiana, porque ele leva em conta corretamente os cálculos de teoria da relatividade geral de Einstein.

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) é uma ferramenta que tem trazido transformações inéditas. Concebido para uso militar, seu funcionamento requer da correção de efeitos relativistas. A grande velocidade dos satélites produziria um atraso no seu tempo em relação a nós de até 10 microsegundos por dia [$\mu\text{s}/\text{dia}$]. Como eles estão em órbita, o campo gravitacional neles é 25% inferior ao sentido na superfície da Terra. Isso produz um adiantamento de mais de 40 $\mu\text{s}/\text{dia}$, de acordo com a relatividade geral. Esses e outros efeitos da relatividade precisam ser levados em conta para permitir a localização acurada com o GPS. Fonte: <https://www.sciencephoto.com/media/1021903/view/gps-navigation-satellite-network>



Passados cem anos do primeiro teste da relatividade geral, essa teoria revolucionária se tornou um elemento central para a compreensão do nosso Universo e passou a fazer parte do cotidiano de grande parte da população mundial. Será que as equipes envolvidas nessa medida gloriosa do desvio da luz em 1919 tinham ideia da dimensão das implicações que viriam a ter os resultados que eles estavam a obter?

O sucesso da primeira comprovação da teoria da relatividade geral foi noticiado de maneira inédita na história. As mídias conseguiram popularizar a relevância do resultado, com uma narrativa “épica”. A figura de Einstein virou referência do cientista, com cabelos desarrumados e olhar profundo, se constituindo em um ícone pop. Hoje, mais do que antes, as consequências das ideias de Einstein estão inseridas na cotidianidade.
Fonte: Acervo fotográfico MAST



REALIZAÇÃO

**MAST – Museu de Astronomia
e Ciências Afins**

*Ministro de Estado de Ciência,
Tecnologia e Inovações*
Marcos Cesar Pontes

Secretário-Executivo
Julio Francisco Semeghini Neto

Secretário-Executivo Adjunto
Carlos Alberto Flora Baptistucci

Subsecretário de Unidades Vinculadas
Gerson Nogueira Machado
de Oliveira

*Diretora do Museu de
Astronomia e Ciências Afins*
Anelise Pacheco

Organização
Anelise Pacheco
João dos Anjos

Direção de arte
Jair de Souza

Design
Jair de Souza
Natali Nabekura

Textos
Luiz Alberto Oliveira
Martin Makler
Oscar T. Matsuura

Edição e Revisão dos textos
Diana de Medeiros

Tratamento de imagem
Alan Remedio
Edilene Ferreira
Gustavo Mamede
Igor Salmito

Agradecimentos
Gisela Zingon
Vladimir Suarez



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
E INOVAÇÕES



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL

OUTUBRO DE 2020

“O IMPOSSÍVEL EXISTE ATÉ QUE ALGUÉM DUVIDE DELE E PROVE O CONTRÁRIO”

ALBERT EINSTEIN

“O mundo moderno começou em 29 de maio de 1919, quando fotografias de um eclipse solar, tiradas na Ilha do Príncipe, na África Ocidental, e em Sobral, no Brasil, confirmaram a verdade da nova teoria do universo.”

– PAUL JOHNSON



MINISTÉRIO DA
**CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
E INOVAÇÕES**



PÁTRIA AMADA
BRASIL
GOVERNO FEDERAL