

RELATIVIDADE GERAL: FUNDAMENTOS E PRIMEIRA COMPROVAÇÃO EXPERIMENTAL

Jorge Castiñeiras e Luís Carlos Bassalo Crispino

Neste ano de 2019 comemora-se o primeiro centenário de um dos eventos mais importantes da história da ciência. Em 29 de maio de 1919, em terras brasileiras, uma equipe britânica de cientistas realizou medições astronômicas, que só poderiam ser feitas durante um eclipse total do Sol, testando experimentalmente, com sucesso, pela primeira vez, as previsões de uma das teorias científicas mais audaciosas já imaginada, a teoria da relatividade geral (TRG) [1]. A TRG havia sido publicada quase quatro anos antes pelo físico Albert Einstein, nascido na Alemanha, e — juntamente com a relatividade especial, publicada em 1905 [2] — revolucionou profundamente o entendimento sobre conceitos fundamentais da física como tempo, espaço, massa, energia, gravidade e luz. A concordância entre as previsões da TRG e as medições astronômicas de 1919 promoveu o seu criador a celebridade mundial.

FUNDAMENTOS DA TRG Por mais fantásticas que possam parecer as implicações da TRG, elas podem ser compreendidas, em grande parte, como consequência de três princípios físicos: o **princípio da relatividade**, o **princípio da invariância da velocidade da luz** e o **princípio da equivalência**. As origens de dois destes princípios (o da relatividade e o da equivalência) se entrelaçam historicamente com as próprias origens do conhecimento científico, que hoje chamamos simplesmente de ciência.

Galileu Galilei, um dos pais da ciência moderna, publicou em 1623 *O ensaiador (Il saggiaiore, em italiano)* [3]. Neste livro, em particular, e nos livros seguintes de Galilei, é possível identificar a defesa de alguns dos princípios fundamentais do método científico. Para ele, o conhecimento resulta da experimentação e da observação detalhada — não só qualitativa, mas também quantitativa — dos fenômenos naturais. Galilei ressalta a necessidade de se estabelecerem padrões rígidos para as medições feitas nesse processo, de modo que os resultados, uma vez divulgados amplamente, possam ser comparados com aqueles obtidos de forma independente por outros cientistas. De acordo com ele, esse conhecimento deve ser organizado e condensado em leis e teorias, usando, para esse fim, a linguagem da lógica e da matemática, evitando ao máximo a influência de quaisquer preconceitos religiosos ou filosóficos. Ainda segundo Galilei, essas leis e teorias não são dogmas, nem verdades absolutas e devem ser corrigidas ou descartadas quando entrarem em contradição com novas observações e experimentos. É essa construção coletiva, rigorosa, objetiva, transparente e falseável, em estado permanente de

revisão e autocorreção, que sustenta, ainda hoje em dia, o grande prestígio da ciência.

Cerca de dez anos depois, em 1632, em seu livro *Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo (Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, em italiano)* [4], o próprio Galilei introduziu o **princípio da relatividade**, fazendo notar que nenhum experimento realizado no porão (sem janelas) de um navio nos permite distinguir se o navio está parado no cais ou se está se movendo com velocidade constante (sem balançar, nas águas tranquilas de uma baía). Ou seja, as regras que governam o movimento dos corpos dentro do porão do navio são as mesmas em ambas as situações, tornando impossível, por esta via, definir o estado de movimento do navio de maneira absoluta. Assim, se o navio está em uma das duas situações descritas acima (parado ou se movendo em velocidade constante), a única forma de determinar completamente seu estado de movimento é medindo a variação (por unidade de tempo) da posição do navio em relação ao cais, ou seja, determinando a sua velocidade relativa ao cais.

O **princípio da equivalência** tem a sua origem na lei da queda livre dos corpos, publicada por Galilei na sua obra *Duas novas ciências (Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze, em italiano)*, datada de 1638 [5]. Reza a lenda que Galileu teria soltado, simultaneamente, duas balas de canhão de massas muito diferentes do alto da torre de Pisa e as duas teriam batido no chão ao mesmo tempo, jogando por terra, assim, a teoria aristotélica vigente havia mais de mil anos. Independentemente de ele ter ou não, de fato, realizado esse suposto experimento da torre de Pisa, Galilei se convence daquela que ficou conhecida como **lei da queda livre dos corpos**, fazendo medições muito precisas do movimento de diferentes corpos ao longo de planos inclinados, com diferentes graus de inclinação. De acordo com essa lei, em condições ideais (quando a resistência do ar e o atrito forem irrelevantes), em um mesmo ponto na vizinhança da Terra, todos os corpos caem livremente com a mesma aceleração, independentemente das suas massas.

No contexto da mecânica de Isaac Newton, essa lei representa a equivalência entre a massa gravitacional e a massa inercial de cada corpo. Ou seja, se um corpo tem uma capacidade de interagir gravitacionalmente duas vezes maior do que a de outro, então, para ser acelerado, ele também oferece uma dificuldade duas vezes maior — de modo que a aceleração de ambos os corpos durante a queda livre é a mesma. Esses conceitos fazem parte das leis do movimento e da lei da gravitação universal, todas elas enunciadas por Newton e publicadas nos *Princípios matemáticos da filosofia natural (Philosophie naturalis principia mathematica, em latim)*, em 1687 [6, 7]. A publicação desta obra, mostrando a visão de Newton, sustentada sobre ombros de gigantes como Nicolau Copérnico, Tycho Brahe, Johannes Kepler e Galilei, é considerada o ápice da revolução científica que marcou o começo da ciência moderna.

Foi precisamente esse princípio da equivalência que guiou Einstein na realização de uma proeza incomum na física teórica: o desenvolvimento de uma teoria que descreve corretamente uma interação

(gravitacional, nesse caso) em um novo regime (campos intensos) sem a contrapartida de muitos resultados experimentais e/ou observacionais. Einstein, mediante o famoso experimento mental, hoje conhecido como “elevador de Einstein”, ilustrou como esse princípio pode tornar localmente indistinguíveis a inércia e a gravitação. Ou seja, se o seu laboratório (sem janelas) for suficientemente pequeno e leve e os experimentos realizados nele forem suficientemente breves, nenhum resultado de tais experiências permite distinguir se esse laboratório está uniformemente acelerado (numa espaçonave com seu motor foguete ligado, por exemplo) longe de qualquer astro (na ausência de gravidade) ou se está apoiado na superfície de um planeta sob os efeitos do campo gravitacional do mesmo. Einstein ressaltou também que, se esse laboratório está em queda livre no campo gravitacional de um planeta, tudo o que estiver dentro dele estará caindo do mesmo modo, tornando o resultado de qualquer experimento idêntico ao obtido quando o laboratório está se movendo livremente (na espaçonave com o motor foguete desligado, por exemplo) longe de qualquer astro.

Assim, para saber o que deve prever uma teoria para a gravidade do planeta em cada situação, bastaria saber o que acontece dentro desse laboratório, longe de qualquer astro (na ausência de gravidade), em cada caso correspondente. Não por acaso, ninguém sabia melhor do que Einstein o que acontece na ausência de gravidade, pois a teoria necessária, nesse caso, tinha sido publicada por ele mesmo em 1905, a teoria da relatividade especial (TRE) [2].

FUNDAMENTOS DA TRE A TRE, ou, mais especificamente, a mecânica relativística, nos permite determinar o movimento dos corpos em cada situação, a partir do conhecimento das interações a que estão submetidos. A discrepância entre as previsões da mecânica relativística e as da mecânica newtoniana são imperceptíveis a baixas velocidades e se tornam cada vez maiores na medida em que as velocidades se aproximam da velocidade da luz.

A TRE foi construída sobre dois princípios. Primeiro, sobre o **princípio da relatividade generalizado**, para incluir também os fenômenos eletromagnéticos (ou seja, no exemplo de Galilei, não só os experimentos envolvendo corpos em movimento, mas também os experimentos envolvendo campos eletromagnéticos são incapazes de determinar se o navio está parado ou em movimento com velocidade constante em relação ao cais). Segundo, sobre o **princípio da invariância da velocidade da luz**, que afirma que a magnitude da velocidade da luz no vácuo é a mesma para todos os observadores inerciais, independentemente da velocidade da fonte de luz em relação ao observador. Na construção da TRE, Einstein assumiu que as equações de Maxwell (que governam o comportamento dos campos elétricos e magnéticos e que implicam na existência de ondas eletromagnéticas, como a luz, com velocidade $c=3,00 \times 10^8$ m/s — trezentos milhões de metros por segundo — no vácuo) são as equações corretas em cada sistema de referência inercial.

A partir dessas hipóteses é possível explicar os experimentos de Albert Abraham Michelson e Edward Williams Morley, as medições

das mudanças cíclicas das aberrações estelares, assim como os experimentos de Armand Hippolyte Louis Fizeau — que constituíam um conjunto de experiências e observações que se tornavam contraditórias entre si à luz da hipótese do éter luminífero (meio elástico no qual se propagariam as ondas eletromagnéticas), forçando assim o abandono dessa ideia [8].

Para conciliar o caráter relativo do movimento com a invariância da velocidade da luz, Einstein teve que abrir mão da concepção newtoniana do espaço e do tempo como entidades absolutas, universais, imutáveis e independentes entre si. Na TRE, dois eventos simultâneos para um observador não são simultâneos para outro observador que se move em relação ao primeiro; e a distância entre esses dois eventos é diferente para cada um. Apenas uma combinação específica da distância e do intervalo de tempo entre cada par de eventos (chamada de **intervalo espaço-temporal**) ganha caráter absoluto e universal.

Para identificar cada evento são necessários quatro números: um especificando quando o evento aconteceu e três especificando onde. O intervalo espaço-temporal entre pares de eventos pode ser imaginado como uma generalização espaço-temporal (quadridimensional) do quadrado da distância (métrica) euclidiana entre pares de pontos do nosso espaço tridimensional, definindo assim a geometria do continuum espaço-tempo, quadridimensional, formado pelos eventos. Por exemplo, o intervalo espaço-temporal nos permite determinar a geodésica entre cada par de eventos, ou seja, a curva (no continuum espaço-tempo, quadridimensional) entre cada par de eventos ao longo da qual o valor absoluto do intervalo espaço-temporal é mínimo. Outra informação importante contida no intervalo espaço-temporal é a chamada estrutura causal do espaço-tempo. Se tomarmos um evento na história de uma partícula, o sinal do intervalo espaço-temporal entre este evento e cada um dos outros nos permite determinar quais eventos poderiam, de alguma forma, fazer parte da trajetória espaço-temporal (ou linha de mundo) da partícula e quais não poderiam, de forma alguma.

Se privilegiamos a dimensão de comprimento na definição do intervalo espaço-temporal, ou seja, se representamos cada distância em metros e cada intervalo de tempo pelo número de metros que a luz percorre no vácuo naquele intervalo de tempo, então cada metro ao longo da trajetória (linha de mundo) de uma partícula massiva no espaço-tempo (determinado mediante o uso dos intervalos espaço-temporais) representa um metro-luz de tempo próprio da partícula (tempo marcado por um relógio que acompanha a partícula). (O metro-luz pode ser entendido como a unidade de tempo que corresponde ao tempo que a luz leva para percorrer um metro, no vácuo.) Assim, dividindo o número de metros que a partícula se “desloca” no espaço-tempo (ao longo da sua linha de mundo em “direção” ao seu futuro) pelo correspondente intervalo de tempo próprio, verificamos que a magnitude do quadrivetor velocidade da partícula é sempre constante e igual à velocidade da luz (igual a um metro por metro-luz). Se a partícula estiver livre de qualquer interação, a direção da sua quadrivelocidade permanece constante e a partícula se move ao longo de uma geodésica. Se a partícula estiver

interagindo, então a direção da sua quadrivelocidade pode mudar e a massa inercial da partícula caracteriza a dificuldade que a partícula oferece a mudanças dessa direção.

Outra descoberta fascinante da TRE é que a massa (vezes o quadrado da velocidade da luz) representa também a quantidade de energia que a partícula possui estando em repouso (energia de repouso), abrindo assim o caminho para a exploração da energia nuclear (que resulta da variação da massa durante os processos de fissão de átomos pesados, como urânio e plutônio, ou durante a fusão de átomos leves, como hidrogênio e deutério), assim como da completa transformação da matéria em energia, que acontece quando matéria e antimatéria se aniquilam entre si. Por outro lado, o grau de dificuldade que cada corpo oferece a mudanças na sua velocidade (no espaço tridimensional) é determinado pela sua energia total (energia cinética mais energia de repouso). Quanto maior for a sua energia, maior será a sua inércia, de tal modo que resulta impossível acelerar qualquer corpo massivo até atingir a velocidade da luz.

INTERAÇÃO GRAVITACIONAL NA TRG A grande ideia de Einstein na criação da TRG foi perceber que, graças ao princípio da equivalência, não era necessária uma força para descrever a interação gravitacional entre os corpos, como entre uma partícula e um astro, por exemplo. Como a trajetória de cada partícula em queda livre não depende da massa da partícula, e como na vizinhança de uma partícula em queda livre tudo acontece como se a partícula estivesse se movendo livremente, longe de qualquer astro, Einstein assumiu que, nas proximidades de um astro, cada partícula se move livremente ao longo de geodésicas de um espaço-tempo deformado pela presença do astro. Essas geodésicas espaço-temporais, quando projetadas no nosso espaço tridimensional, constituem aproximadamente as elipses (características do movimento dos planetas ao redor do Sol, por exemplo), parábolas e hipérbolas previstas pela teoria de Newton. A discrepância entre as trajetórias previstas pela TRG e as previstas pela teoria de Newton é tanto maior quanto mais próximo do astro estiver a partícula, ou seja, quanto mais intenso for o campo gravitacional.

Assim, sendo o campo gravitacional do Sol o mais intenso do nosso sistema solar, e sendo Mercúrio o planeta mais próximo do Sol, de acordo com a TRG, Mercúrio deveria seguir a trajetória mais discrepante em relação à teoria newtoniana. Com a TRG, Einstein conseguiu [9] pela primeira vez obter o valor correto da precessão anômala do periélio de Mercúrio [10]. Esta precessão constitui uma violação das leis de Kepler para o movimento dos planetas, já percebida pelos astrônomos havia mais de meio século, a partir de medições muito precisas, feitas ao longo de 400 anos, e cuja intensidade ninguém tinha conseguido derivar, nem a partir da perturbação gravitacional gerada por quaisquer outros planetas, nem a partir do grau de diferença (conhecido até então) entre a forma do Sol e a forma de uma esfera.

Curiosamente, nas chamadas **equações de Einstein**, que definem como a presença de um objeto deforma o espaço-tempo, o que determina tal deformação (e, conseqüentemente, a interação

gravitacional) não é apenas a massa do objeto, mas sim seu tensor de energia-momento, uma grandeza que caracteriza o conteúdo de massa-energia, o seu movimento, assim como as pressões e as tensões às quais o objeto está submetido. Esses novos parâmetros, determinando a interação gravitacional entre objetos, levaram à descoberta de um conjunto de novos efeitos físicos como, por exemplo, o arrasto de referenciais (*frame-dragging*, em inglês) gerado pela rotação dos astros, a precessão geodética (torque que a deformação do espaço-tempo provoca sobre um objeto em rotação em torno de seu próprio eixo e que, além disso, está orbitando um astro, por exemplo) e a repulsão gravitacional que a energia escura estaria exercendo sobre as galáxias (o que explicaria a expansão acelerada do universo) por causa da sua pressão suficientemente negativa. Os buracos negros e as ondas gravitacionais são também grandes descobertas devidas a deformações no espaço-tempo que a equação de Einstein prevê.

DESVIO GRAVITACIONAL DA LUZ O princípio da equivalência, ao garantir que próximo à superfície do Sol o efeito do campo gravitacional sobre a propagação da luz seria localmente equivalente à propagação da luz em relação a um referencial uniformemente acelerado, já indicava que a luz proveniente de uma estrela distante e que passasse rente à superfície do Sol deveria sofrer um desvio (tanto de acordo com a mecânica newtoniana quanto de acordo com a teoria einsteiniana).

Ainda em 1911 [11], Einstein divulgou uma estimativa preliminar do valor para o desvio da luz que passasse rente à superfície do Sol, e fez a primeira proposta de experimento para verificar o resultado: a intensidade do desvio da luz poderia ser medida durante um eclipse total do Sol, momento no qual o disco lunar passa precisamente em frente ao disco solar, encobrindo-o completamente, tornando possível observar a luz proveniente das estrelas ao fundo. A estimativa de Einstein, publicada em 1911, estava incorreta, coincidindo aproximadamente com o resultado obtido por Johann Georg von Soldner, publicado mais de cem anos antes, com base na teoria newtoniana [12]. O desvio da luz proveniente de cada estrela distante se traduz numa mudança nas posições relativas aparentes das estrelas no entorno do disco solar, afastando as suas imagens para longe do centro do disco do Sol. Visto da Terra, o efeito que o campo gravitacional nas proximidades do Sol exerce sobre a luz é similar ao de uma grande lente de aumento com o disco solar no seu centro e com uma distância focal tanto maior quanto mais distante estiverem do eixo óptico os raios de luz incidentes. Após ter essa ideia, Einstein indaga a alguns astrônomos sobre a possibilidade de verificação do efeito durante um eclipse solar.

No ano seguinte, equipes de vários países se dirigiram ao sudeste brasileiro para observar o eclipse do Sol de 10 de outubro de 1912 [13]. Entre os astrônomos que aqui vieram, estava Charles Dillon Perrine, à época diretor do Observatório de Córdoba, na Argentina, que, sabendo das ideias de Einstein sobre o desvio da trajetória da luz, tentaria verificar a modificação da posição relativa das estrelas próximas ao Sol eclipsado [14, 15]. Como membros da comitiva

britânica, na ocasião, vieram ao Brasil Arthur Stanley Eddington e Charles Rundle Davidson, que tinham por objetivo fazer medições relacionadas com as propriedades da coroa solar. O mau tempo fez com que nenhuma das comissões que vieram ao Brasil em 1912 tivessem sucesso na observação daquele eclipse.

Em 25 de novembro de 1915, Einstein comunicou, na Academia Prussiana das Ciências de Berlim, na Alemanha, a TRG com a versão final de suas equações de campo [1], sucedendo em uma semana sua comunicação da estimativa corrigida da deflexão da luz, com o valor de 1,75 segundos de arco na borda do Sol [9], um número duas vezes maior que o resultado obtido pelo cálculo newtoniano. Assim, se a TRG estivesse correta, a deflexão da luz seria duas vezes maior do que previa a teoria newtoniana; e, se o princípio da equivalência não fosse válido para as ondas eletromagnéticas, o campo gravitacional não promoveria qualquer desvio na trajetória da luz.

EXPEDIÇÕES EM 1919 Em nenhum dos eclipses totais do Sol que sucederam o de outubro de 1912 foi possível verificar o encurvamento da luz, até 29 de maio de 1919. Para a ocasião, o Comitê Conjunto Permanente de Eclipses (Joint Permanent Eclipse Committee, em inglês) organizou duas expedições — uma delas para a África e outra para o Brasil [16]. A comissão que seguiu para a costa oeste africana foi composta por Eddington e Edwin Turner Cottingham, enquanto a comissão que seguiu para o Brasil foi composta por Andrew Claude de la Cherois Crommelin e Davidson (que estivera no Brasil na comitiva em 1912). As duas expedições britânicas saíram juntas de Liverpool em 8 de março de 1919. Eddington e Cottingham chegaram ao seu destino, a Ilha do Príncipe, em 23 de março, e Crommelin e Davidson chegaram a Sobral, cidade de observação do eclipse no Brasil, no dia 30 do mesmo mês, após uma passagem pela Amazônia [17, 18], durante a qual foi publicado, em um jornal de Belém do Pará, um artigo explicando o objetivo daquela expedição britânica ao Ceará [15, 19, 20].

A montagem dos telescópios levados pelos britânicos para a observação era tal que os equipamentos permaneciam fixos na horizontal, e a compensação do movimento de rotação da Terra era feita por espelhos, denominados celóstatos, acoplados a mecanismos de relojoaria, que projetavam a imagem do campo que incluía o Sol eclipsado em direção às lentes objetivas dos telescópios, até as placas fotográficas sucessivamente inseridas na outra extremidade dos tubos que compunham a montagem dos telescópios.

Para a Ilha do Príncipe, no Golfo da Guiné, costa oeste africana, Eddington e Cottingham levaram a lente de 13 polegadas do telescópio astrográfico de Oxford, que foi utilizada com um redutor para oito polegadas, por sugestão de Davidson. O mau tempo prejudicou as observações. Eles obtiveram 16 fotografias, com exposições entre 2 e 15 segundos, das quais nas nove primeiras não foi possível

identificar qualquer estrela. Em apenas duas placas fotográficas puderam ser identificadas as três estrelas principais (entre elas estão as que compõem a estrela dupla capa (κ), da constelação do Touro) que permitiriam o cálculo mais preciso do desvio da luz. A melhor delas, obtida com uma exposição curta de três segundos, foi revelada ainda em Príncipe, enquanto a outra, obtida com uma exposição de 10 segundos, só foi revelada após o retorno da expedição à Inglaterra.

Para a medição da variação na posição aparente das estrelas, era necessário obter fotografias do mesmo campo visual, mas sem o Sol. Para evitar uma greve no transporte marítimo, o que faria com que eles ficassem retidos ali por vários meses [16], Eddington e Cottingham optaram por retornar à Inglaterra logo em seguida, sem obter as fotos comparativas na Ilha do Príncipe. Deixaram a ilha no dia 12 de junho, chegando em Liverpool no dia 14 de julho. As fotos comparativas foram realizadas por Frank Arthur Bellamy ainda em Oxford (com a lente em sua montagem original), em janeiro de 1919, portanto antes da ida para a África. As imagens comparativas foram obtidas para a região do campo estelar do eclipse, e também para uma outra região, em torno da estrela Arcturus. As medidas das placas fotográficas obtidas na África foram realizadas por Eddington, utilizando o equipamento comparador de Cambridge, obtendo o resultado de $1,61 \pm 0,30$ segundos de arco na borda do Sol, favorecendo os cálculos corrigidos de Einstein, publicados em 1915 [9].

Para a cidade de Sobral, no estado do Ceará, no nordeste brasileiro, Crommelin e Davidson levaram dois telescópios. O principal deles era semelhante ao levado para a África. Era composto pela lente objetiva de 13 polegadas do telescópio astrográfico de Greenwich, também utilizado com

um redutor para oito polegadas, alimentado pela luz proveniente de um celóstato de 16 polegadas. O segundo telescópio, tido como um instrumento reserva, contava com uma lente objetiva de quatro polegadas, alimentada pela luz proveniente de um celóstato de oito polegadas. Com o telescópio maior, foram obtidas 19 fotografias, enquanto que com o telescópio reserva foram obtidas oito fotografias.

Em Sobral, também se fizeram presentes duas outras comissões para a observação do eclipse de 1919 (Figura 1) [21]. Uma da Instituição Carnegie, dos Estados Unidos, composta por Daniel Maynard Wise e Andrew Thomson, com o objetivo de realizar medidas do magnetismo terrestre e da eletricidade atmosférica; e outra do Observatório Nacional brasileiro, liderada por Henrique Charles Morize, com o objetivo de realizar medições da coroa solar, além de dar suporte às comissões estrangeiras [22].

Assim como em Príncipe, o mau tempo também prejudicou as observações em solo brasileiro. No entanto, em Sobral, foram obtidas muito mais fotografias com estrelas. As 19 fotografias obtidas com o telescópio astrográfico de 13 polegadas (reduzido para oito polegadas) utilizado em Sobral, com tempo de exposição alternando entre 5 e 10

**AS IMAGENS
OBTIDAS COM O
TELESCÓPIO
RESERVA FORAM
REPUTADAS
COMO
DE QUALIDADE
MUITO BOA**



Figura 1. Comitativas brasileira, britânica e norte-americana que foram a Sobral para a observação do eclipse de 29 de maio 1919. À frente (da esquerda para a direita): Domingos Fernandes da Costa, com sua esposa (Dona Pequeninina) e sua filha (Lêda), Rosa Ribeiro dos Santos Morize (esposa de Henrique Morize), Andrew C. D. Crommelin, Charles R. Davidson e Andrew Thomson. Atrás (da esquerda para a direita): Luiz Rodrigues, Theophilo Henry Lee, Daniel M. Wise, Henrique C. Morize, Allyrio Huguene de Mattos, Lelio Itapuambyra Gama, Antonio C. Lima e Primo Flores. Cortesia da Biblioteca do Observatório Nacional, Rio de Janeiro. Fonte: Cortesia da Biblioteca do Observatório Nacional, Rio de Janeiro

segundos, apresentaram imagens difusas e fora de foco, não sendo, portanto, de boa qualidade. Dezesseis dessas fotografias exibiram pelo menos sete estrelas, enquanto que em outras foram identificadas até 12 estrelas. A má definição das imagens foi atribuída, pelos próprios observadores britânicos, principalmente ao mau funcionamento do celóstato maior, que teria sofrido uma dilatação não uniforme devido à variação da temperatura durante o eclipse. Tal conclusão foi obtida já em Sobral, após a revelação das imagens fotográficas.

Já as oito imagens obtidas com o telescópio reserva, todas com 28 segundos de exposição em placas fotográficas de 10 por oito polegadas, foram reputadas como de qualidade muito boa (Figura 2). Das oito fotografias, sete exibiram sete estrelas, enquanto que na outra não foram identificadas estrelas, devido à presença de nuvens.

Crommelin e Davidson permaneceram no Ceará por cerca de dois meses após o eclipse. Eles aguardaram em Fortaleza até que as estrelas fotografadas durante o eclipse pudessem ser novamente fotografadas em uma altura no céu semelhante a das fotografias iniciais (mas sem o Sol acima do horizonte), o que ocorreu no mês de julho. Essas fotografias seriam fundamentais para uma boa aferição das modificações de suas posições relativas aparentes. Eles foram de Sobral para Fortaleza no dia 7 de junho, após revelarem todas as fotografias obtidas no dia do eclipse, deixando fechada a tenda de abrigo dos telescópios (Figura 3). Retornaram a Sobral no dia 9 de julho para obter as placas fotográficas de comparação, concluindo as imagens no dia 18 daquele mês.

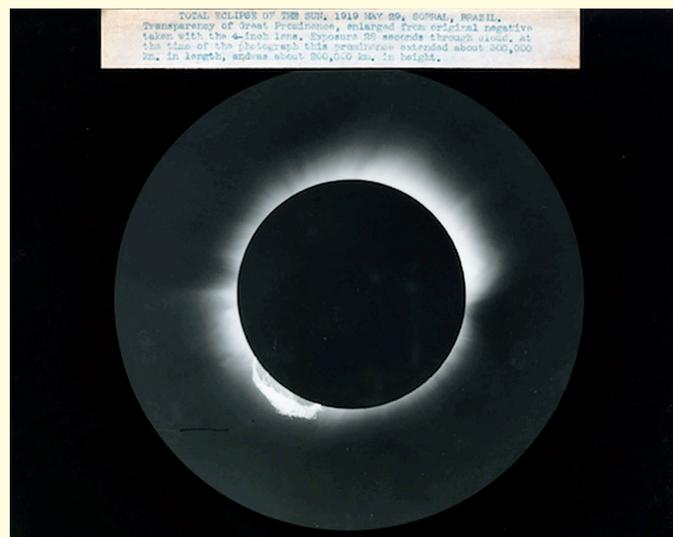


Figura 2. Uma das placas fotográficas obtidas com uma exposição de 28 segundos feita com o telescópio de quatro polegadas utilizado em Sobral. Fonte: Cortesia do National Maritime Museum, Greenwich, Londres, Inglaterra



Figura 3. Em primeiro plano, na pista de corrida de cavalos de Sobral, vê-se o abrigo (fechado) dos telescópios trazidos pela comissão britânica, em foto tirada por Daniel Maynard Wise, em 11 de junho de 1919. Atrás do abrigo, a casa do coronel Vicente Saboya, onde Crommelin e Davidson ficaram hospedados em Sobral. Fonte: Cortesia do Instituto Carnegie, Departamento de Magnetismo Terrestre, EUA

Crommelin e Davidson deixaram Sobral definitivamente no dia 22 de julho, chegando de volta em Greenwich no dia 25 de agosto. Durante a viagem de volta para a Inglaterra, os britânicos passaram alguns dias em Belém do Pará, onde deram uma entrevista que foi publicada em um periódico daquela cidade [19].

De volta a Greenwich, as imagens obtidas em Sobral foram analisadas. O resultado obtido em primeira análise para o telescópio de maior diâmetro (com as mesmas características do utilizado em

Príncipe) foi de $0,93 \pm 0,50$ segundos de arco na borda do Sol. Tal resultado estava entre o valor newtoniano (0,87 segundos de arco) e o valor corrigido por Einstein em 1915 (1,75 segundos de arco), sendo mais próximo do primeiro. No entanto, já no artigo original, publicado em 1920 [16], foi registrado que, se fosse levada em consideração a mudança de escala ocasionada pelos efeitos de refração e aberração, o resultado passaria a ser $1,52 \pm 0,46$ segundos de arco na borda do Sol, com maior concordância com o resultado corrigido de Einstein. (Este último resultado, concordante com a TRG, foi confirmado por uma reanálise das placas fotográficas realizada no final da década de 1970 [23].) De qualquer forma, devido aos problemas com as imagens, que se apresentaram bastante difusas, os resultados obtidos com a lente de 13 polegadas (reduzida para oito polegadas) utilizada em Sobral não foram considerados importantes.

Para o telescópio reserva de quatro polegadas (com o qual foram obtidas imagens muito superiores às dos telescópios astrográficos), a partir de medidas feitas em Greenwich por Davidson e Furner, o resultado para o desvio foi de $1,98 \pm 0,18$ segundos de arco na borda do Sol, um valor ligeiramente superior ao previsto pela TRG.

O anúncio do triunfo da TRG sobre a teoria newtoniana foi feito durante uma sessão conjunta da Royal Society e da Royal Astronomical Society britânicas ocorrida em Londres, em 6 de novembro de 1919, presidida por sir Joseph John Thomson. Sob a liderança de Frank Watson Dyson, astrônomo real britânico, foi tomada a decisão de basicamente desconsiderar os resultados de má qualidade obtidos pelo telescópio astrográfico levado para Sobral [20, 24]. O artigo original, contendo os resultados das expedições britânicas para a observação do eclipse, foi publicado no ano seguinte, assinado por Dyson, Eddington e Davidson [16]. Após esses acontecimentos, Einstein, até então um físico que possuía algum reconhecimento entre seus colegas da comunidade acadêmica, se transformou em uma celebridade mundial, sendo agraciado com o Prêmio Nobel de Física em 1921.

As medições mais precisas da deflexão da luz, que foram realizadas durante os eclipses de 1922, 1929, 1936, 1947, 1952 e 1973 [25], permaneceram em concordância com as previsões da TRG. No entanto, o salto qualitativo na precisão das medições do desvio da radiação eletromagnética pelo campo gravitacional do Sol veio com a medição da mudança na posição aparente de intensas radiofontes (como quasares) quando estão próximas do disco solar [26]. Essas medições são feitas usando rádio-interferometria de linha de base muito longa (*very long baseline radio interferometry* — VLBI, em inglês), técnica capaz de produzir imagens com grande resolução angular — e que permitiu a produção da primeira imagem da sombra de um buraco negro (cuja existência é mais uma previsão da TRG), divulgada no dia 10 de abril deste ano [27]. Por usar ondas de rádio, a técnica não precisa da ocorrência de um eclipse e, quando aplicada usando-se diferentes comprimentos de onda, ainda permite discriminar quanto do desvio é devido à deformação do espaço-tempo e quanto é devido à refração das ondas eletromagnéticas na coroa solar. A partir de quase dois milhões de observações VLBI de 541 radiofontes, coletadas entre 1979

e 1999 em 87 localidades ao redor do mundo [26], foi possível atingir incertezas relativas várias ordens de grandeza menores que as obtidas nas primeiras medições do desvio da luz. A alta precisão dessas medições consolidaram ainda mais a TRG e conseguiram descartar várias teorias alternativas à teoria gravitacional de Einstein.

UMA NOVA ERA DE TESTES Nos dias atuais, medidas dos desvios na posição aparente de estrelas permitem inferir dados que, de outra forma, seriam impossíveis de se determinar. Por exemplo, uma equipe de pesquisadores liderada pelo astrônomo Kailash Chandra Sahu, usando o telescópio espacial Hubble, observou uma estrela anã branca, Stein 2051 B, passando na frente de outra estrela mais distante [28]. Durante a passagem, a posição aparente da estrela mais distante sofreu um desvio de 2 milissegundos de arco. A medição desse efeito de microlentes gravitacionais permitiu determinar que a massa da anã branca (que está a 17 anos-luz do nosso sistema solar) é 68% a massa do nosso Sol.

Foi preciso aguardar até a década de 1960 para que outro teste clássico na TRG, proposto por Einstein em 1916 [29], pudesse ser realizado com sucesso. Além da precessão do perélio de Mercúrio e da medição do desvio da luz pelo campo gravitacional do Sol, Einstein pensou na seguinte forma de verificar a sua teoria: a medição do desvio para o vermelho (*redshift*, em inglês) gravitacional. Usando o efeito Mössbauer, Robert Vivian Pound e Glen Anderson Rebka Jr. [30] conseguiram medir, pela primeira vez, mudanças muito pequenas no comprimento de onda de raios gama caindo livremente no campo gravitacional da Terra. Tal experimento também verificou a previsão da TRG de que o ritmo de um relógio depende da sua distância em relação ao centro da Terra — ou, de modo mais geral, de sua localização em uma região de campo gravitacional não homogêneo. Sem levar em conta esse efeito, os *smartphones*, muito comuns hoje em dia, usando o sistema de posicionamento global [*global positioning system* (GPS), em inglês], seriam incapazes de determinar a nossa posição com tanta precisão.

O experimento de Pound e Rebka inaugurou uma nova era de testes de alta precisão da TRG, que continua até os dias de hoje, com destaque para resultados épicos, como: (i) as detecções diretas de ondas gravitacionais (provenientes da fusão de dois buracos negros e também da fusão de duas estrelas de nêutrons) feitas pelas colaborações denominadas Observatório Avançado de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser (Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory — Ligo, em inglês) e Virgo, a partir de 2015 [31, 32] — um século após a publicação da TRG; (ii) a obtenção da primeira imagem da sombra de um buraco negro, feita pela colaboração denominada Telescópio Horizonte de Eventos (Event Horizon Telescope — EHT, em inglês) e publicada este ano [27] — um século após a primeira comprovação experimental da TRG em Sobral.

Jorge Castiñeiras é professor associado da Universidade Federal do Pará (UFPA). Email: jcastin@ufpa.br

Luís Carlos Bassalo Crispino é professor titular da UFPA. Email: crispino@ufpa.br

AGRADECIMENTOS

Somos gratos a Daniel John Kennefick, da Universidade do Arkansas, nos Estados Unidos, por discussões sobre o tema deste artigo. Luís Carlos Bassalo Crispino agradece o apoio financeiro parcial do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

1. Brito, I. Tradução a partir do original alemão "Die feldgleichungen der gravitation", A. Einstein, *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, v. 2, 844-847, 25.11.1915. (As equações de campo da gravitação, A. Einstein, Atas da Academia Prussiana das Ciências de Berlim.) *Boletim da Sociedade Portuguesa de Matemática*, v. 73, pp. 127-144. 2015.
2. Einstein, A. "Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento". In: *Textos fundamentais da física moderna, volume I (O princípio da relatividade)*, pp. 47-86. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 1983. (Tradução de Mário J. Saraiva do artigo "Zur elektrodynamik bewegter Körper". *Annalen der Physik*, v. 17, pp. 891-921. 1905.)
3. Galilei, G. *Il sagggiatore*. Seconda edizione. Giangiacomo Feltrinelli Editore, Milano. 2008.
4. Galilei, G. *Diálogo sobre os dois máximos sistemas do mundo – ptolomaico e copernicano*. (Tradução, introdução e notas de Pablo R. Mariconda.) Discurso Editorial/Imprensa Oficial, São Paulo. 2004.
5. Galilei, G. *Dois novas ciências*. (Tradução e notas de Letizio Mariconda e Pablo R. Mariconda.) Nova Stella Editorial, São Paulo. 1988.
6. Newton, I. *Principia: Princípios matemáticos de filosofia natural – Livro I*. (Tradução de Trieste Ricci, Leonardo G. Brunet, Sônia T. Gehring e Maria H. C. Célia.) 2a. edição. Editora da Universidade de São Paulo (Edusp), São Paulo. 2002.
7. Newton, I. *Principia: Princípios matemáticos de filosofia natural – Livros II e III*. (Tradução de André K. T. Assis.) Editora da Universidade de São Paulo (Edusp), São Paulo. 2008.
8. Resnick, R. *Introdução à relatividade especial*. (Tradução de Shigeo Watanabe.) Editora Polígono / Editora da Universidade de São Paulo (Edusp), São Paulo. 1971.
9. Einstein, A. "Erklärung der perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen relativitätstheorie". *Sitzungsberichte Preussische Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, v. 2, pp. 831-839. 18.11.1915.
10. Le Verrier, U. J. J. "Lettre de M. Le Verrier à M. Faye sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète". *Comptes rendus hebdomadaires des séances de L'Académie des sciences (Paris)*, v. 49, pp. 379-383. 1859.
11. Einstein, A. "Sobre a influência da gravidade na propagação da luz". In: *Textos fundamentais da física moderna, volume I (O princípio da relatividade)*, pp. 127-140. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 1983. (Tradução de Mário J. Saraiva do artigo "Einfluss der schwerkraft auf die ausbreitung des lichtetes". *Annalen der Physik*, v. 35, pp. 898-908. 1911.)
12. Soldner, J. G. v. "Ueber die Ablenkung eines lichtstrals von seiner geradlinigen bewegung, durch die attraktion eines weltkörpers, an welchen er nahe vorbei geht". *Berliner Astronomisches Jahrbuch (1801-1804)*, pp. 161-172. 1801.
13. Caffarelli, R. V. "O eclipse solar de 1912". *Ciência e Cultura*, v. 32, n. 5, pp. 561-573, 1980.
14. Coles, P. "Einstein, Eddington and the 1919 eclipse". ArXiv, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0102462>. 2001.
15. Crispino, L. C. B.; Lima, M. C. de. "Amazonia introduced to general relativity: the may 29, 1919, solar eclipse from a north-brazilian point of view". *Physics in Perspective*, v. 18, pp. 379-354. 2016.
16. Dyson, F. W.; Eddington, A. S.; Davidson, C. "A determination of the deflection of light by the Sun's gravitational field, from observations made at the total eclipse of may 29, 1919". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 220, pp. 291-333. 1920.
17. Crommelin, A. C. D. "The eclipse expedition to Sobral", *The Observatory*, London, v. 42, pp. 368-371. 1919.
18. Lima, M. C. de; Crispino, L. C. B. "Crommelin's and Davidson's visit to Amazonia and the 1919 total solar eclipse", *International Journal of Modern Physics D*, v. 25, 1641002-1-1641002-5. 2016.
19. Crispino, L. C. B.; Lima, M. C. de. "A teoria da relatividade de Einstein apresentada para a Amazônia". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, e4203-1-e4203-12. 2016.
20. Crispino, L. C. B.; Kennefick, D. J. "A hundred years of the first experimental test of general relativity", *Nature Physics*, v. 15, pp. 416-419. 2019.
21. Crispino, L. C. B. "Expeditions for the observation in Sobral, Brazil, of the may 29, 1919 total solar eclipse", *International Journal of Modern Physics D*, v. 27, 1843004-1-1843004-10. 2018.
22. L. C. B. Crispino e M. C. de Lima, "Expedição norte-americana e iconografia inédita de Sobral em 1919". *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 40, e1601-1-e1601-8. 2018.
23. Harvey, G. M. "Gravitational deflection of light: a re-examination of the observations of the solar eclipse of 1919". *The Observatory*, London, v. 99, pp. 195-198. 1979.
24. Kennefick, D. J. "Testing relativity from the 1919 eclipse – a question of bias", *Physics Today*, v. 62, pp. 37-42. 2009.
25. Will, C. M. *Theory and experiment in gravitational physics*. Revised Edition. Cambridge University Press, Cambridge. 1993.
26. Shapiro, S. S.; Davis, J. L.; Lebach, D. E.; Gregory, J. S. "Measurement of the solar-gravitational deflection of radio waves using geodetic very-long-baseline interferometry data, 1979-1999". *Physical Review Letters*, v. 92, pp.1101-1104. 2004.
27. Akiyama, K. et al. (The Event Horizon Telescope Collaboration). "First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole". *Astrophysical Journal Letters*, v. 875, L1-1-L1-17. 2019.
28. Sahu, K. C. et al., "Relativistic deflection of background starlight measures the mass of a nearby white dwarf star". *Science*, v. 356, pp.1046-1050. 2017.
29. Einstein, A. "Os fundamentos da teoria da relatividade geral". In: *Textos fundamentais da física moderna, volume I (O princípio da relatividade)*, pp. 141-214. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa. 1983. (Tradução de Mário J. Saraiva do artigo "Die grundlagen der allgemeinen relativitätstheorie". *Annalen der Physik*, v. 49, pp. 769-822. 1916.)
30. Pound, R. V.; Rebka Jr., G. A. "Gravitational red-shift in nuclear resonance". *Physical Review Letters*, v. 3, pp. 439-441. 1959.
31. Abbott, B. P. et al. (Ligo and Virgo Scientific Collaboration). "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger". *Physical Review Letters*, v. 116, 061102-1-061102-16. 2016.
32. Abbott, B. P. et al. (Ligo and Virgo Scientific Collaboration). "GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral". *Physical Review Letters*. v. 119, 161101-1-061101-18. 2017.