

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

REINALDO RAMOS DE CARVALHO ^{1,2}, RAMACHRISNA TEIXEIRA ³

¹ NAT - Universidade Cruzeiro do Sul / Universidade Cidade de São Paulo

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

³ Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas / Universidade de São Paulo (USP)

<reinaldo.carvalho@inpe.br><rama.teixeira@iag.usp.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v13i2.1672

Resumo. Neste trabalho apresentamos uma revisão histórico-científica da importância da observação do eclipse solar ocorrido em Sobral em 1919. Revisamos alguns conceitos fundamentais que norteiam a história desta observação, que deu validade experimental à Teoria da Relatividade Geral (TRG). Considerando a importância que a observação teve na história da física, oferecemos uma narrativa que se inicia nos primórdios do pensamento humano, passando por diferentes épocas do nosso desenvolvimento como espécie até chegarmos aos estudos pré-Relatividade. A observação do eclipse de Sobral abriu novos horizontes na cosmologia, não só permitindo uma nova abordagem para o estudo do Universo em grande escala mas também por definir ferramentas que permitem mapear a distribuição de massa utilizando o fenômeno de lente gravitacional. Discutimos as medidas do desvio da luz de estrelas do aglomerado das Hyades e discorremos brevemente sobre a importância de uma revisão crítica da história da observação do eclipse e suas consequências para a qualidade da ciência que realizamos no país atualmente.

Palavras-chaves: Espaço-Tempo. Curvatura. Relatividade Geral. Cosmologia

Abstract. We present a historical-scientific review of the importance of the observation of the solar eclipse occurred at Sobral in 1919. We discuss some fundamental concepts that guide the history of this observation, which gave experimental validity to the Theory of General Relativity. Considering the importance that this observation had in the history of physics, we offer a narrative that begins at the dawn of human thought, passing through different epochs of our development as a species until we reach pre-Relativity studies. The observation of the Sobral eclipse opened new horizons in cosmology, not only allowing a new approach to the study of the large scale structure of the universe but also by defining tools that help us mapping the mass distribution using the so called gravitational lens phenomenon. We present the measurements of the deviations of the starlight from the Hyades cluster and briefly discuss the importance of a critical review of the history of the eclipse observation and its consequences for the quality of science we carry out in the country today.

Keywords: Space-time. Curvature. General Relativity. Cosmology

1 INTRODUÇÃO

Desde a primeira observação do céu a olho nu, nossa espécie mantém uma crescente curiosidade em relação à natureza que a cerca. Podemos imaginar em épocas pré-históricas, com o céu absolutamente escuro, sem luzes de cidades como hoje em dia, a sensação de encantamento tomando a mente de nossos ancestrais. Ao

longo dos séculos, o Homo Sapiens evoluiu através da Grande Cadeia do Ser, que simboliza um esquema geral das coisas contidas no Universo predeterminando as idéias que permeiam todas as áreas do conhecimento humano (LOVEJOY, 1936). A cosmologia se define neste conceito, procurando reunir todo o conhecimento em um quadro cósmico unificador.

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

A história da cosmologia mostra que em todas as sociedades, ao longo dos tempos, os cientistas acreditaram ter encontrado, finalmente, a explicação última de como o Universo opera em grandes escalas. Desde os mitos babilônicos (MUNITZ, 1957) até a era da ciência moderna, muitos foram os modelos sobre a natureza do Universo. (HARRISON, 1985) propõe que na verdade cada sociedade que acredita ter encontrado a explicação final para o Universo, nada mais fez do que vestir uma “máscara” que se ajusta na face do Universo desconhecido. A partir deste conceito, Harrison propõe que usemos “universo” para nos referirmos aos modelos que pretendem explicar o “Universo” desconhecido.

Na cosmologia moderna o trabalho dos observadores é complementado (e coordenado) com o dos teóricos, sendo que estes propõem “modelos” do Universo como um todo, tendo por base os dados recentemente obtidos e aceitos pela comunidade científica. Estes modelos, por sua vez, auxiliam os cosmólogos observacionais em sua procura por novo material empírico. É importante lembrar que tais modelos têm por base conceitual a física matemática e a TRG proposta por Einstein em 1915.

O estágio atual da cosmologia é de grande atividade, seja no campo observacional seja no teórico. As observações permitem cada vez mais explorar o Universo como um todo, onde vemos um padrão geral de crescimento tanto da quantidade de informação como das idéias que explicam os dados. Para termos uma perspectiva mais ampla do que foi o desenvolvimento da cosmologia distinguimos aqui quatro etapas distintas: 1) a mudança dos métodos utilizados pelas cosmogonias míticas para uma visão mais racional dos pré-Socráticos e da escola Pitagórica. Vale ressaltar que no pensamento grego estão os elementos embrionários de especulação científica como entendemos hoje em dia; 2) o aparecimento, no período clássico da filosofia e astronomia Grega, da cosmologia geocêntrica através dos trabalhos de Platão, Aristoteles e Ptolomeu; 3) o ataque à cosmologia clássica que se iniciou no final da Idade Média e se estendeu até a virada do século XIX para o século XX. As contribuições de Copérnico, Newton, Galileu, Kant e outros foram decisivas para a triunfal derrota da cosmologia clássica. Esta fase é caracterizada por descobertas observacionais e tentativas teóricas conceituais que contribuíram significativamente para estabelecer os fundamentos da cosmologia moderna; 4) na segunda década do século XX o uso de grandes telescópios promoveu uma verdadeira revolução em nosso entendimento do cosmos. Enquanto isso, o trabalho teórico de cientistas como Friedmann, Einstein, Hoyle e outros, usando ferramentas matemá-

ticas avançadas, levaram à construção de novos modelos de Universo. Nascia o conceito de “Expansão do Universo” .

Neste trabalho celebramos o centenário da observação que validou a teoria que revolucionou a física e por consequência a cosmologia. O eclipse solar total observado a partir de Sobral no Ceará, forneceu dados que mostraram que as previsões de Einstein estavam corretas e começava então uma história de confirmações da TRG que recentemente foi ampliada pela observação de Ondas Gravitacionais (ANDREW, 2016). Apresentamos uma visão histórico-científica deste evento. Da cosmologia mítica até o aparecimento da TRG, apresentamos uma narrativa que nos permite colocar a observação de Sobral numa perspectiva mais ampla. Cosmologia e sociedade estão intimamente relacionadas. Onde existe uma sociedade existe um universo e neste universo existem indivíduos pensando na origem do mesmo. Entender como chegamos até Sobral se faz mister se queremos entender no que nos transformamos hoje em dia, uma sociedade científica à procura de novos horizontes

2 DO UNIVERSO MÁGICO AO GEOMÉTRICO

A cosmologia é tão antiga quanto a história da humanidade. O interesse do Homem pelo Universo que o cerca provavelmente teve início quando da formação dos primeiros grupos sociais primitivos, que desenvolveram a linguagem, há centenas de milhares de anos. Os seres humanos de então “explicavam” o mundo por meio de espíritos, que se manifestavam de várias formas e eram sempre motivados por impulsos e paixões humanas. Projetavam pensamentos e sentimentos internos em um mundo externo animista - era como se tudo no mundo tivesse uma essência espiritual, tudo era vivo. Assim, o Homem primitivo controlava os fenômenos do mundo e os explicava pelas paixões, motivos e ações de espíritos que a tudo habitavam (MALINOWSKI, 1948).

A partir de civilizações como os Sumérios (3000 AC) e os Acádios (2500 AC), desenvolveu-se conceitos mais abstratos do Universo - o mundo mágico transformou-se num universo mítico. Os espíritos que antes permeavam todas as coisas, agora viraram mitos, deuses que personificavam pensamentos abstratos. Em todas as mitologias do passado encontramos uma visão de como o Cosmos foi criado e estas descrições são importantes por que mostram como evoluiu a percepção do nosso Universo ao longo dos séculos, sem que nenhuma dessas descrições sejam mais importantes que outras - são apenas reflexos de nós mesmos (HARRISON, 1985). Desde tal época nos colocávamos no centro do Universo, o que parecia óbvio, uma vez que

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

os deuses e nós mesmos não poderíamos estar em outra posição que não fosse de destaque. O Antropocentrismo foi a base da cosmologia Grega. O universo de Aristóteles (~ 400AC) era geocêntrico e somente cerca de 500 anos mais tarde é que Ptolomeu melhor elaborou o sistema e mostrou que o mesmo ajustava bem as observações da época. Este modelo, apresentado em seu trabalho fundamental *Almagesto*, era puramente geométrico e ainda geocêntrico como o de Aristóteles e descrevia relativamente bem os movimentos dos planetas. Somente quatorze séculos mais tarde é que os trabalhos revolucionários de Copérnico, Kepler e Galileu mostraram que este modelo não era satisfatório (NEUGEBAUER, 1957; DRAKE, 1957; DUHEM, 1985).

A Revolução Copernicana teve um significado fundamental para a história da ciência - passamos do universo geocêntrico de Ptolomeu para um universo heliocêntrico, mas mais importante, tiramos o Homem de sua posição até então privilegiada no centro do Universo (GINGERICH, 2004). Em apenas um século tivemos então o surgimento do universo Cartesiano e subsequentemente o universo Newtoniano. A Revolução Copernicana abriu caminho para a cosmologia moderna, onde não existe centro de espécie alguma.

3 COSMOLOGIA DEPOIS DE NEWTON E ANTES DE EINSTEIN

Baseado sobretudo nos trabalhos de Tycho Brahe, Galileu e Kepler, Newton, na segunda metade do século XVIII, resolveu uma das principais questões cosmológicas da época: os movimentos planetários. Além de fornecer um modelo preciso para o movimento orbital dos planetas, inclusive da Terra, Newton eliminou as esferas onde se encontravam os corpos celestes e não só explicou a queda dos corpos na superfície da Terra, como corretamente, percebeu que a lei que governava os movimentos na Terra era a mesma que governava os movimentos no céu.

A Lei da Gravitação Universal foi a primeira das quatro leis da natureza descobertas pelo Homem até hoje. Com isso Newton consolidou a revolução iniciada, pouco mais de 100 anos antes, por Copérnico com um modelo heliocêntrico, enterrando de vez a visão predominante até então, de um universo geocêntrico. Para Newton os movimentos planetários resultavam de um movimento de queda permanente em direção ao corpo central, neste caso o Sol, associado a um movimento inercial de fuga na direção tangencial. A atração gravitacional responsável pela queda dos corpos no Universo substituiu as esferas materiais, já bombardeadas por Giordano Bruno e que resistiram até Kepler.

Paralelamente à euforia provocada pelos resultados

oriundos da aplicação da visão de Newton muito além dos movimentos planetários, as observações do céu, já com telescópios, estenderam o Universo observado muito além do Sistema Solar. Além de ampliar em muito o número de corpos celestes que se podia observar, inclusive novos planetas, o telescópio associado a um bom sistema de relógios, possibilitou ao Homem, a medida de posições estelares com precisões muito melhores.

Com isso, em 1718 Halley, ao descobrir que as estrelas, antes consideradas fixas, na realidade se movimentavam umas em relação às outras, deu início a uma nova era da cosmologia, agora forçada a contabilizar os movimentos estelares. Entretanto, o Universo observado não parou por aí. Em torno de um século depois, Herschel concluiu que vivíamos em um mundo em forma de lente, ideia que evoluiu para o que hoje sabemos a respeito da forma da Via Láctea, descobriu os sistemas estelares binários e o movimento do Sol no espaço com seu cortejo de planetas ao redor do centro galáctico. Cem anos mais, o Homem finalmente foi muito além das estrelas e com Hubble descobriu a existência de muitas outras galáxias. Slipher detectou pela primeira vez o então movimento de recessão das galáxias que culminou na famosa lei de Hubble: quanto mais distante maior a velocidade com que as galáxias parecem se afastar de nós. Finalmente, nos anos 1920, Friedmann, com base na TRG de Einstein (1915), pode concluir que as galáxias não se afastavam de nós, mas o que estávamos vendo era consequência da expansão do espaço-tempo, era o Universo se expandindo. A soma de todo esse conhecimento, teórico e observacional, resultou na extração, posteriormente aperfeiçoada e confirmada, de Lemaître, Gamow e outros, de que o Universo teve um começo.

Embora, a ideia da expansão fuga totalmente do senso comum, um espaço dinâmico que pode se expandir, se contrair e se deformar resultava da nova e revolucionária teoria sobre a gravitação apresentada por Einstein em 1915, a TRG. Essa nova teoria diferia profundamente da visão de Newton, então aceita há mais de 200 anos, conhecida como Lei da Gravitação Universal.

Por exemplo, na visão newtoniana o espaço e o tempo eram considerados absolutos e as leis de movimento supunham a existência de um referencial absoluto. E nesse contexto, a gravidade era uma propriedade dos corpos: os corpos se atraem e a força dessa atração depende das suas massas e da distância que os separa. Já, na visão einsteiniana o espaço e o tempo não são absolutos e dependem do referencial. Além disso, podem se contrair ou se dilatar e são considerados entidades

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

inseparáveis em uma nova concepção chamada espaço-tempo. Neste novo contexto, diferentemente da visão dominante até então, a gravidade não é mais vista como uma propriedade dos corpos, mas sim do espaço-tempo o qual é deformado pela presença da matéria: quanto mais massivo for o corpo maior a deformação (HARTLE, 2003).

4 DO ESPAÇO CURVO AO NASCIMENTO DA RELATIVIDADE GERAL

Neste ponto é importante revermos um pouco da história de nosso conhecimento das diferentes geometrias, desde a antiguidade. É importante observar que o estudo da geometria ajudou o Homem em seu trabalho de entender as propriedades do Universo como um todo. Difícil distinguir que idéias influenciaram mais.

As Pirâmides de Gizé podem ser vistas como a representação do quanto a geometria significava para os povos antigos. No entanto, os conceitos mais primitivos, pré-Euclidianos, vinham da experiência, da tentativa e erro. O número π , por exemplo, era calculado como a razão entre a circunferência e o diâmetro e tinha uma valor de 3.1605, sempre constante quando se mediam círculos de diversos diâmetros. Era um valor obtido na prática, não havia uma abordagem lógica para se determinar o valor, por exemplo, da área do círculo. Somente com Euclides (~ 330 AC) é que surgiu a geometria como conhecemos hoje em dia. Para isso, ele usou um processo denominado axiomático. Axiomas expressam fatos que são assumidos como verdadeiros e se alguma dúvida paira sobre tais enunciados enuncia-se postulados que tratam das consequências lógicas dos axiomas. Euclides então usou cinco axiomas e a partir dos mesmos deduziu toda a geometria em 465 teoremas. No contexto deste trabalho o axioma de maior interesse versa sobre o conceito de paralelismo. Duas linhas retas contidas no mesmo plano são paralelas se elas não se intersectam. Esta idéia de paralelismo incomodou muitos matemáticos por muitos séculos, inclusive Euclides. Na prática, o que encontramos são segmentos de reta e não retas de comprimento infinito. Então como podemos estar seguros de que as mesmas não se intersectam? Na verdade, o conceito de paralelismo é o que distingue o espaço euclidiano de outros possíveis espaços que são representados por uma geometria não-euclidiana (GREENBERG, 1973). O espaço euclidiano é homogêneo, ou seja, todas as regiões do espaço são iguais, e isotrópico, todas as direções são equivalentes. Estes conceitos formam a base do Princípio Cosmológico. Duas geometrias não-euclidianas são de particular interesse: a hiperbólica, descoberta por Johan Gauss no século XIX; e a esférica, desco-

berta por Georg Riemann também no mesmo século. Em ambos os casos tais geometrias possuem uma escala de tamanho intrínseca de tal forma que em todas as regiões de tamanho muito menor do que esta escala, estas geometrias podem ser aproximadas como euclidiana. Assim, para distinguirmos entre tais geometrias precisamos medir escalas de tamanho bastante grandes. Nossa experiência diária advém da observação de escalas pequenas (em relação ao tamanho do próprio Universo) e isso explica nossa preferência pela geometria euclidiana que não possui nenhuma escala intrínseca de tamanho.

Nestas geometrias um conceito fundamental é o de curvatura. Um espaço euclidiano (espaço plano) tem curvatura zero; o espaço esférico (fechado) tem curvatura igual ao inverso do quadrado do raio de curvatura; e o espaço hiperbólico (aberto) tem curvatura negativa. Uma boa representação do espaço hiperbólico é a superfície de uma sela de cavalo. O conceito de curvatura, surgido no século XIX quando várias geometrias não-euclidianas começaram a ser estudadas, deve ser entendido como uma propriedade geométrica intrínseca do espaço.

O estudo de geometria teve um impulso considerável através do trabalho de George Bernard Riemann (JAGGI, 1967). Com base nos trabalhos de Gauss, Riemann percebeu que para uma dada superfície podemos definir um dado sistema métrico, ou seja, uma equação que determine a distância entre quaisquer dois pontos nesta superfície. Podemos imaginar o Teorema de Pitágoras como um caso particular, em duas dimensões, da expressão mais geral - (intervalo de espaço)² = F(intervalo em x)² + 2G(intervalo em x × intervalo em y) + H(intervalo em y)², onde F, G, e H são funções das variáveis x e y. No caso em que F = 1, G = 0 e H = 1, obtemos o Teorema de Pitágoras em sua forma tradicional e conhecida. Se deformarmos a superfície onde se define o sistema cartesiano de coordenadas de maneira “suave”, as linhas do sistema de coordenadas também se deformam. A distância entre os pontos ainda é dada pela equação acima, no entanto, as funções F, G e H são alteradas.

A contribuição inovadora de Riemann foi desenvolver uma geometria diferencial para espaços de dimensões superiores onde os coeficientes métricos na equação métrica dependem de coordenadas arbitrárias e as propriedades do espaço são expressas por equações diferenciais que determinam como os coeficientes métricos variam de lugar pra lugar no espaço.

Riemann foi o primeiro a perceber que esta descrição geométrica poderia ter consequências mais profundas na própria física. No entanto, foi William Clif-

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

ford, um matemático que deu prosseguimento ao trabalho de Riemann, que antecipou a idéia de conexão entre o espaço-tempo em expansão da cosmologia moderna e a geometria ao sugerir que a variação na curvatura poderia produzir no espaço variações físicas aparentes, ou seja, surgia a idéia de associação entre geometria e movimento. Clifford foi um matemático extraordinário, com idéias corajosas para sua época, que lançou idéias que formam a base da Relatividade Geral quarenta anos antes de Einstein (CLIFFORD, 1955).

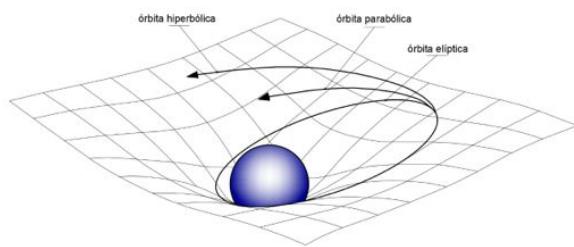


Figura 1: Visão esquemática da deformação do espaço devido a presença de um objeto massivo e as três possíveis trajetórias dependentes da velocidade inicial da bolinha teste (Arte elaborada por André Moreau, a quem agradecemos).

Um dos conceitos fundamentais da Relatividade Geral é o princípio da equivalência - forças gravitacionais e iniciais produzem efeitos indistinguíveis (BERGMANN, 1968). Este princípio segue o mesmo caminho da intuição de Clifford, ou seja, estabelece uma conexão entre movimento e gravidade. Da mecânica Newtoniana aprendemos que uma força inercial existe quando um corpo é acelerado e que um corpo é dito em queda-livre, ou seja move-se livremente sob a ação da gravidade, quando segue uma trajetória onde a soma da força inercial e da força gravitacional é zero. Podemos pensar num laboratório no espaço sem janelas que permitam observar o exterior, longe de qualquer outro corpo celeste, de tal forma que a ação da gravidade sobre o laboratório é zero. O laboratório move-se livremente e já que não há fonte de aceleração a força inercial experimentada pelo laboratório é nula. Este movimento é denominado inercial. Qualquer experimento realizado para detectar aceleração resulta em que o laboratório é não-acelerado. Imaginemos agora que o laboratório passe próximo a uma estrela, os testes realizados continuarão a indicar não-aceleração uma vez que o laboratório seguirá uma trajetória de queda-livre e a força inercial resultante de sua aceleração cancela a força gravitacional devido à estrela. Esta equivalência entre força inercial e gravitacional forma a base das idéias de Einstein. Além disso, Einstein percebeu a similaridade entre a curvatura e a gravidade. Imaginemos

uma superfície de borracha sobre a qual jogamos uma pequena esfera de baixa massa. A esfera irá percorrer uma linha reta a velocidade constante (ignoremos o atrito). Agora, se colocarmos uma esfera bem pesada no centro da superfície, esta será deformada de tal forma que ao jogarmos a esfera nesta superfície poderemos observar três tipos de órbitas, dependendo da velocidade inicial da bolinha (Figura 1). Assim, Einstein estabeleceu a relação entre movimento e curvatura. Tais idéias na época foram vistas como extremamente ousadas, mas como acontece em ciência, teorias precisam passar pelos experimentos propostos que são capazes de mostrar a validade das mesmas.

5 SOBRAL, UMA EXPERIÊNCIA QUE REVOLUCIONOU A CIÊNCIA

Ná década de 1930, a TRG de Einstein concordava muito bem e previa justamente o que vinha sendo observado pelos astrônomos: a expansão do Universo. Dessa forma, tornou-se a base teórica que sustenta a ideia que temos de que o Universo teve um começo e que está em contínua evolução da qual originou-se tudo o que existe inclusive nós mesmos.

Assim, sendo essa teoria a essência da cosmologia moderna, sua confirmação em 1919 com observações astrométricas realizadas em Sobral – CE e Príncipe na África, foi um dos fatos científicos mais relevantes da história da Ciência. Provar que essa nova visão da gravitação concordava muito bem com as observações e que previa fenômenos que se confirmavam, significava também, mostrar que a interpretação poucos anos depois, de que o espaço-tempo se expande e que o Universo teve uma origem e evolui, estava correta.

A prova mais robusta de que uma teoria funciona é seu bom acordo com a observação e descrição precisa de um fenômeno por ela previsto. A primeira prova robusta de que a visão de Einstein concordava melhor com a realidade observational do que aquela de Newton, ocorreu com a medida do desvio gravitacional sofrido pela luz ao passar por um campo gravitacional, a chamada deflexão gravitacional.

As duas teorias previam o desvio de um raio de luz ao passar próximo a um corpo. A causa desse desvio e sua dimensão são diferentes segundo uma ou outra visão da gravitação. Naturalmente, o quanto a luz é desviada e a divergência nas previsões segundo uma ou outra teoria, dependem da intensidade do campo gravitacional produzido pelo corpo defletor. Quanto mais intenso o campo gravitacional, mais evidente é o desvio e a diferença entre as duas previsões. Como os campos gravitacionais mais intensos de que dispomos são aqueles associados a corpos celestes e a posição de uma estrela

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

no céu nada mais é do que a direção de onde vem a luz, o principal teste da deflexão gravitacional da luz tornou-se um problema da Astronomia ou mais especificamente, da Astrometria, ramo dessa ciência voltado para a determinação de posições e movimentos dos corpos celestes. Assim, o desvio do feixe de luz que recebemos de uma dada estrela corresponde a uma alteração de sua posição no céu quando observada na presença e na ausência de um campo gravitacional.

Considerando a precisão com que se podia determinar posições estelares no início do século XX, era necessário medir a deflexão provocada por um campo gravitacional muito mais intenso que aquele produzido pela Terra ou mesmo por Júpiter. Assim, as atenções voltaram-se para o Sol que produz um campo gravitacional suficientemente intenso para provocar uma deflexão mensurável no início do século XX.

Dessa forma, o cenário idealizado de presença e ausência de um campo gravitacional intenso na direção de uma dada estrela seria materializado pelo Sol, que devido ao movimento orbital da Terra, conhecido como movimento de translação, aparenta passear entre as estrelas, pelas famosas constelações zodiacais. Ao longo do ano, o Sol se afasta, angularmente falando, de um determinado grupo de estrelas e se aproxima de outro. Note que o Sol, do ponto de vista espacial, está a muitos trilhões de quilômetros das estrelas, mas apesar disso, pode ser visto aproximadamente na mesma direção em que vemos um grupo de estrelas e nesse caso dizemos que encontra-se angularmente próximo desse grupo.

Assim, como previsto, a luz de uma estrela ao passar próxima ao bordo solar, sofreria um desvio alterando sua posição no céu, como mostrado na Figura 2. No caso da visão newtoniana, esse desvio seria causado pela atração gravitacional do Sol sobre as partículas de luz. Já no caso da visão einsteiniana, esse desvio seria causado pela deformação do espaço-tempo provocada pela presença do Sol. O cálculo desse desvio resultava no dobro do valor para a visão einsteiniana em relação à newtoniana.

Medir o desvio gravitacional da luz, como dito, se resumia em medir as alterações nas posições (deslocamentos aparentes) de estrelas quando angularmente próximas e quando angularmente afastadas do Sol.

O desvio gravitacional deveria ser radial a partir do centro do disco solar e deveria ser maior quanto mais próxima, angularmente falando, a estrela estivesse desse centro. No caso de uma estrela observada rente ao bordo do Sol, a previsão do desvio do raio de luz segundo a gravitação de Newton era de $0.87''$ enquanto que pela Relatividade Geral de Einstein seria o dobro, $1.75''$. O resultado poderia mostrar que ambas visões

não estavam de acordo com as observações ou que apenas uma delas não correspondia à realidade observacional.

Conceitualmente, como ilustrado na Figura 2, a estratégia é simples: comparar fotografias de um determinado campo estelar, realizadas com e sem a presença do Sol, e medir as alterações nas posições das estrelas fotografadas em uma e outra situação. Na prática, entretanto, essa estratégia é complicadíssima. Naturalmente, não era possível observar (fotografar) um campo de estrelas na presença do Sol em um dia comum. A única possibilidade era realizar essa observação durante um eclipse total do Sol. Neste momento, teríamos o Sol no campo de estrelas, mas um céu relativamente escuro que permitiria enxergá-las. Também, mesmo durante o eclipse total, aquelas estrelas muito próximas ao bordo não poderiam ser observadas devido ao brilho da coroa solar. Isso significa, que os resultados previstos seriam obtidos por extrapolações dos valores alcançados para aquelas estrelas ligeiramente afastadas do bordo. Como em todo trabalho envolvendo medidas, o número de estrelas observadas representa uma maior precisão e portanto, confiabilidade no resultado obtido.

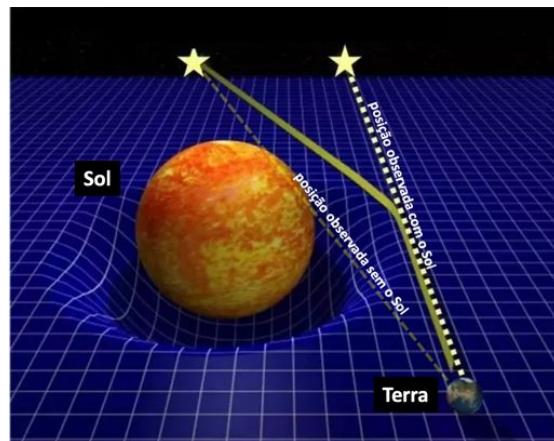


Figura 2: Representação artística do desvio causado pela atração gravitacional do Sol sobre o raio de luz de uma estrela (Crédito: Dave Jarvis, <http://davidjarvis.ca/dave/gallery>)

Na Figura 3, vemos os deslocamentos aparentes (ampliados 1200 vezes) teóricos para 12 estrelas do aglomerado das Hyades. As setas azuis, indicam aquelas efetivamente utilizadas para a confirmação da Relatividade Geral como discutido a seguir. Para 29 de Maio de 1919 estava previsto um eclipse total do Sol excepcional e extremamente favorável à realização desse teste. O Sol teria ao seu redor, a companhia de estrelas relativamente brilhantes do aglomerado das Hyades. Justamente o fato de termos estrelas brilhantes ao redor do

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

Sol é que tornava esse eclipse raro e tão favorável para confirmar ou não a existência do desvio gravitacional da luz e qual das duas teorias fornecia resultados mais próximos da realidade observacional. A coincidência do valor calculado pela teoria com o valor observado, validaria a teoria. Essa confirmação seria robusta pois estaria baseada em uma previsão das próprias teorias.

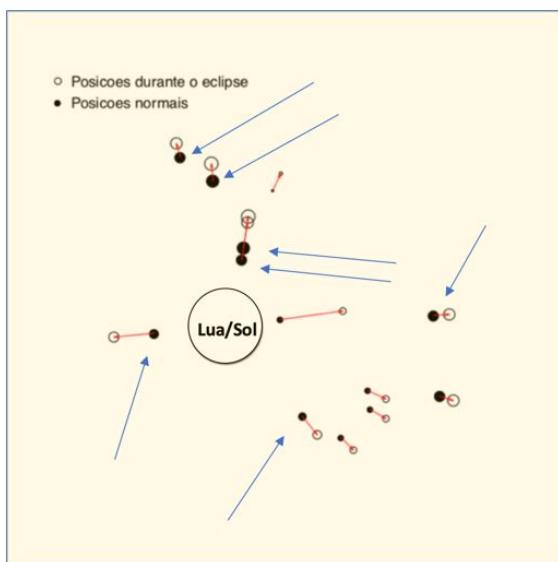


Figura 3: Desvios aparentes medidos no plano do céu (ampliados de 1200 vezes). Setas pretas indicam as medidas que foram efetivamente utilizadas para confirmar a TRG (Vide texto)

Esse eclipse total de 1919 ocorreu em uma faixa que passava pelo Chile, Brasil, Oceano Atlântico, Golfo da Guiné e Oceano Índico. No ponto de duração máxima no Oceano Atlântico, teve aproximadamente 7 minutos de totalidade, e nos locais escolhidos para a realização das observações, em torno de 5 minutos. Pesquisadores ingleses, sob a liderança de F.W. Dyson, se interessaram por essa empreitada e organizaram uma expedição com astrônomos de Cambridge à ilha de Príncipe no Golfo da Guiné (DYSON F. W.; EDDINGTON; DAVIDSON, 1920), com Eddington e Cottingham à frente, e outra com astrônomos de Greenwich a Sobral no Ceará, liderada por Crommelin e Davidson (CROMMELIN, 1919).

Em Sobral foram utilizados dois telescópios para fotografar o eclipse. O principal deles, um astrógrafo (telescópio para fotografias) de 13 polegadas de abertura do próprio Observatório de Greenwich acoplado a um celostato de 16 polegadas. O celostato corresponde a um arranjo de espelhos que se movimenta acompanhando o Sol ao mesmo tempo que projeta sua imagem em outro instrumento fixo (telescópio). Além disso,

essa expedição contou também, com um telescópio auxiliar e bem menor, de apenas 4 polegadas de abertura, e celostato de 8 polegadas emprestados pela Royal Irish Academy. Em Príncipe foi utilizado um astrógrafo do Observatório de Oxford, parecido com o de Sobral e igualmente alimentado por um celostato.

Em Sobral o céu, embora ruim pela manhã, na hora da observação esteve ótimo possibilitando a obtenção de 15 fotografias com o astrógrafo e 7 com o pequeno telescópio auxiliar. Essas fotografias tinham de 12 a 13 estrelas no campo no caso do astrógrafo e 7 no caso do telescópio auxiliar. Na prática, mesmo durante um eclipse total do Sol não necessariamente temos uma estrela tangenciando o bordo do Sol e mesmo que tivéssemos seria impossível observá-la devido ao brilho da coroa solar. O que se faz então, é observar várias estrelas próximas, obter seus deslocamentos e extrapolar qual seria o deslocamento para uma estrela rente ao bordo. A Figura 4 mostra os deslocamentos previstos e observados para as 7 estrelas observadas com o pequeno telescópio auxiliar. Foram essas medidas que permitiram a extração e a confirmação da TRG.

As imagens do astrógrafo infelizmente, se revelaram ruins para a obtenção de resultados científicos confiáveis. Provavelmente isso ocorreu devido a deformações instrumentais causadas pelo aquecimento. Por outro lado, as fotografias obtidas com o pequeno telescópio puderam ser exploradas (veja Figura 3) e forneceram o seguinte valor para o desvio de uma estrela hipotética tangenciando o bordo solar: $1.98''$ com erro provável de $0.12''$. Em Príncipe, o céu esteve ruim mesmo durante o eclipse e das 16 fotografias realizadas duas pareciam úteis para a obtenção de resultados científicos (CROMMELIN, 1919). Entretanto, uma delas foi descartada, e apenas uma acabou sendo utilizada fornecendo um valor de $1.61''$ com erro provável de $0.30''$. Apesar das dificuldades, o resultado obtido em Príncipe, $1.61'' \pm 0.30''$, e principalmente aquele obtido em Sobral, $1.98'' \pm 0.12''$, confirmaram a existência do desvio gravitacional da luz, ou seja, o deslocamento aparente das estrelas na direção radial a partir do centro do Sol e mais ainda, com valores estatisticamente coincidentes com aquele previsto pela TRG de Einstein. Mais recentemente, as fotografias de Sobral foram novamente analisadas em Greenwich (HARVEY, 1979) com modernas estratégias de medida e redução. Assim, Harvey pode inclusive recuperar as observações realizadas em Sobral com astrógrafo de 13 polegadas. Nesse novo tratamento das observações de Sobral obteve-se $1.90'' \pm 0.11''$ para as observações com o pequeno telescópio e $1.55'' \pm 0.34''$ para aquelas do astrógrafo não aproveitadas em 1919. Essas medidas, confirmaram de

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

maneira irrefutável a TRG. Hoje, com medidas astrométricas até 10 mil vezes melhores, pode-se detectar desvios gravitacionais muito menores, em campos gravitacionais menos intensos e com objetos mais distantes, angularmente falando, do centro do astro defletor. Nas observações astrométricas altamente precisas como aquelas que estão sendo realizadas com o satélite Gaia, a deflexão gravitacional é levada em conta mesmo para aquelas estrelas cuja luz atravessa campos gravitacionais de defletores como a Lua e muitos outros corpos menores do sistema solar. Muitas outras ocasiões e estratégias, desde Sobral, foram utilizadas com sucesso, para validar a TRG. O Satélite astrométrico Gaia está escaneando o céu desde meados de 2014 e medindo posições, movimentos, distâncias e magnitudes de mais de 1,5 bilhão de estrelas com precisões até bem pouco tempo inimagináveis (PRUSTI, 2016). Com o segundo catálogo liberado de dados da missão espacial Gaia o conjunto de dados sobre a qual repousa a Astronomia foi alterada radicalmente abrindo as portas para uma nova era do conhecimento nessa área e em áreas correlatas.

vocou alterações profundas em nossa visão do Universo iniciando uma nova era com um novo e amplo horizonte de pesquisas em Física, Astronomia e Cosmologia. Por exemplo, a noção de espaço-tempo da teoria de Einstein explicou muito bem o que vinha sendo observado no começo do século XX e corretamente interpretado por Alexander Freedman, usando a visão einsteiniana da gravitação: as galáxias não estão se afastando de nós, mas é o Universo que se expande, expansão do espaço-tempo, nos dando essa impressão.

O fenômeno do desvio gravitacional da luz é agora tão bem compreendido, que seu resultado é usado como ferramenta fundamental para investigar a distribuição de matéria no Universo. Por exemplo, esta é uma poderosa ferramenta para se encontrar estrelas que já extinguiam e que portanto não emitem luz e só podem ser detectadas por seu efeito gravitacional. Esta componente pode explicar parte da componente de matéria escura no Universo. É importante lembrar que ainda não sabemos qual a natureza da maior parte da matéria escura no Universo mas seja como for, é principalmente através de seus efeitos gravitacionais que podemos detectá-la.

Lente gravitacional é uma das maneiras que os astrônomos utilizam para aprender sobre objetos “escuros”, os quais interagem somente através da gravidade. Embora estrelas “mortas” não emitam luz, podem existir estrelas que estejam mais distantes e exatamente na mesma linha de visada. Neste caso o fenômeno de lente gravitacional gera um pequeno eclipse da estrela brilhante atrás da estrela “escura”. Esta técnica tem sido usada extensivamente para estimarmos a fração de massa de tais estrelas “escuras” na nossa Galáxia.

O efeito de lente gravitacional é hoje em dia uma das ferramentas mais importante para estudarmos o Universo em grande escala. Figura 5 mostra a imagem obtida com o telescópio Hubble do aglomerado de galáxias SDSS J1038+4849. O arco visível na imagem é causado pelo efeito conhecido como lente gravitacional forte. Aglomerados de galáxias são as estruturas mais massivas do Universo e exercem um efeito gravitacional significativo, distorcendo o espaço-tempo ao seu redor e atuando como uma lente cósmica, que pode amplificar, distorcer e desviar a luz de objetos que estão “atrás” do aglomerado. Neste caso da figura, um anel é produzido, Anel de Einstein, a partir da deflexão da luz do objeto mais distante na mesma linha de visada do defletor.

Este efeito pode também acontecer quando temos uma galáxia massiva atuando como lente. Na Figura 6 vemos o potencial gravitacional de uma galáxia vermelha de alta luminosidade distorcendo a luz de uma outra galáxia azul muito mais distante. Dado o incrível

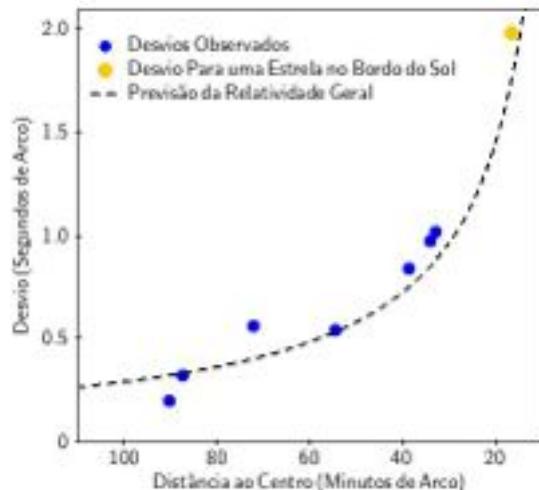


Figura 4: Desvios aparentes em função da distância ao centro do Sol. Note que a linha tracejada representando o modelo explica bastante bem as observações representadas pelo círculos cheios em azul.

6 PARA ALÉM DE SOBRAL

A confirmação, em 1919, das ideias de Einstein sobre a gravitação, medindo o desvio gravitacional da luz de algumas das estrelas do aglomerado das Hyades e mostrando que correspondiam à previsão de sua teoria, permitiu o rompimento de barreiras e a adesão dos cientistas a essa nova concepção da natureza. A TRG pro-

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

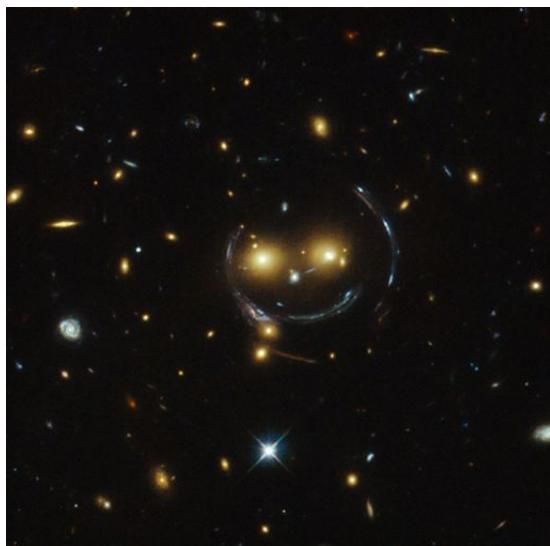


Figura 5: Efeito de lente gravitacional produzido por um aglomerado de galáxias de alta massa. Vemos claramente a presença do Anel de Einstein, manifestando o efeito de lente. Crédito NASA/ESA.

alinhamento das duas galáxias, a galáxia mais distante é deformada em um anel quase completo, parecendo uma ferradura. O fenômeno de lente gravitacional forte mostrado na figura é o que permite aos astrônomos determinar o conteúdo de matéria escura da galáxia mais próxima que age como se fosse uma lente.

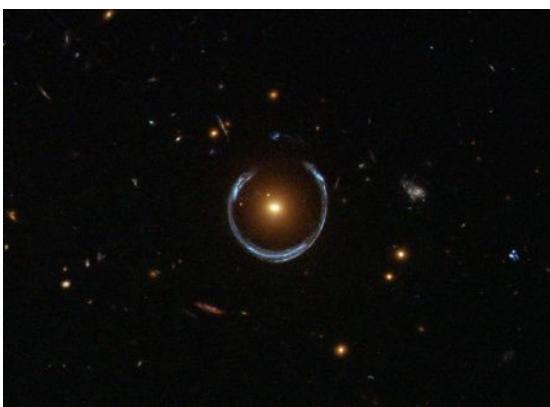


Figura 6: Efeito de lente gravitacional produzido por uma galáxia vermelha e de alta luminosidade. Vemos também neste caso a presença do Anel de Einstein, manifestando o efeito de lente. Crédito NASA/ESA.

As lentes gravitacionais são ao mesmo tempo uma realização e uma prova a mais da TRG de Einstein. As ondas gravitacionais previstas somente na TRG foram recentemente detectadas pela primeira vez e nos lançam em um futuro promissor quando poderemos “ver” um

Universo mais jovem do que podemos hoje, em uma época em que a luz não circulava, deixando-o opaco.

A abrangência do trabalho de Einstein é fantástica, indescritível e incontestável. Embora longe do senso comum Einstein estava certo e a natureza parece mesmo funcionar como ele predisse em uma das mais belas páginas do conhecimento humano. A Terra e todos os corpos do Universo, tão distantes quanto nosso conhecimento alcança, não apenas se movem, mas se movem como previsto e explicado pela TRG de Einstein.

7 Considerações Finais

A cosmologia física atualmente bem aceita (o modelo do Big Bang), propõe um Universo que teve um início há 13,7 bilhões de anos. Mesmo sem ter uma física para falar do que se passou no instante $t = 0$ e menos ainda, antes disso, se é que tem sentido pensar assim, esse modelo se ajusta às vezes muito bem e outras não tão bem, com tudo aquilo que somos capazes de observar hoje em dia. Todo esse conhecimento foi construído com base naquilo que pudemos observar de um ponto do Universo em um lapso de tempo. Temos motivos para nos orgulharmos de nós mesmos por atingir tal nível de consciência.

A observação dos deslocamentos aparentes de estrelas do aglomerado das Hyades em Sobral em 1919, constituiu um evento histórico e de extrema importância para a ciência. Ao contrário do que ocorreu em Príncipe, as 7 placas fotográficas observadas em Sobral e posterior medida do deslocamento aparente das estrelas, com precisões bastante razoáveis, permitiram convencer a comunidade científica da época de que o Universo funciona como previsto pela Teoria da Relatividade Geral.

Este evento em Sobral representa uma contribuição essencial e determinante para a direção em que a cosmologia caminhou desde o início do século XX. Apesar da sua importância, esse feito é muito pouco conhecido em nosso país e também, pouco reconhecido no exterior. Essa falta de um devido reconhecimento é consequência da divulgação antecipada de um dado observational menos confiável por parte da expedição de Príncipe. Quando as placas fotográficas de Sobral chegaram em Greenwich para serem medidas, 3-4 meses após o eclipse, mesmo que não oficialmente, o resultado obtido em Príncipe, embora menos confiável de um ponto de vista estatístico, já havia sido comemorado e circulava como a prova de que a Teoria da Relatividade Geral, com todas suas estranhas concepções do espaço-tempo, realmente funcionava.

Embora, para aqueles que de certa forma tenham algum vínculo com essas expedições e observações ou

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

aqueles que por alguma razão procuraram os detalhes desse feito, os resultados de Sobral **tenham** valor inestimável para a ciência, aqui no Brasil, parece não ter tido o impacto que poderia ter. Por exemplo, desde Sobral, em 1919, quase nada aconteceu em astrofísica no Brasil até 1970 quando a primeira tese em astrofísica foi concluída no Instituto de Tecnologia da Aeronáutica. A tese era intitulada Problemas Instrumentais e Observacionais em Fotometria Fotoelétrica, defendida pelo Dr. Germano Rodrigo Quast e orientada pelo Dr. Sylvio Ferraz de Mello. Podemos dizer que a partir desta tese, a astrofísica teve um impulso considerável e em menos de uma década outras teses foram defendidas e em 1981 entrou em operação o telescópio de 1,6m do Observatório do Pico dos Dias, que até hoje desempenha importante papel no desenvolvimento da astrofísica nacional. No entanto, é importante questionarmos por que é que desde Sobral em 1919, pouco ou quase nada aconteceu em astrofísica no Brasil até 1970, 51 anos. Esta é uma tarefa para historiadores, físicos e astrônomos, investigar o porquê um fenômeno de tão grande impacto na história da ciência, não alavancou a pesquisa em astrofísica no país. Por que os astrônomos brasileiros da época não tiveram interesse na comprovação da Relatividade Geral? Ao contrário, concentraram-se no estudo da coroa solar. É importante lembrar a existência de um impasse historiográfico com relação à participação do Brasil na verificação da Relatividade Geral - a historiografia anglo-saxã não reconhece que as melhores e decisivas fotografias foram obtidas em Sobral (KENNEFICK, 2019).

Foge do escopo deste artigo investigar as relações entre tal historiografia e o presente impacto internacional da pesquisa no Brasil, entretanto, a comemoração dos 100 anos de um evento de tamanha dimensão não deixa de ser uma motivação a mais, para refletirmos sobre o estágio atual da investigação científica no Brasil. Não se pode deixar de reconhecer a essencial contribuição de pesquisadores brasileiros, cearenses ou não, de políticos, tradutores e da população de Sobral em geral, para o sucesso dessa empreitada (RODRIGUES, 2012).

REFERÊNCIAS

- ANDREW, G. Gravity waves from black holes verify einstein's prediction. *Science News*, Society For Science & The Public, v. 189, n. 5, p. 6, 2016.
- BERGMANN, P. G. *The Riddle of Gravitation*. New York: Scribner's Sons, 1968.
- CLIFFORD, W. *The Common Sense of the Exact Sciences*. New York: Dover Publications, 1955.
- CROMMELIN, A. C. D. Results of the total solar eclipse of may 29 and the relativity theory. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 104, p. 280, 1919.
- DRAKE, S. *Discoveries and Opinions of Galileo*. New York: Doubleday, 1957.
- DUHEM, P. *Medieval Cosmology: Theory of Infinity, Place, Time, Void, and the Plurality of Worlds*. Chicago: Chicago University Press, 1985.
- 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 Transaction of the Royal Society of London*, Royal Society, v. 220, p. 291, 1920.
- GINGERICH, O. *The Book Nobody Read*. London: Penguin Books, 2004.
- GREENBERG, M. J. *Euclidean and Non-Euclidean Geometries: Development and History*. San Francisco: W. H. Freeman, 1973.
- HARRISON, E. *The Masks of the Universe*. New York: Macmillan Publishing Company, 1985.
- HARTLE, J. B. *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley, 2003.
- HARVEY, G. M. Gravitational deflection of light – a re-examination of the observations of the solar eclipse of 1919. *The Observatory*, American Institute of Physics., v. 99, p. 195, 1979.
- JAGGI, M. P. The visionary ideas of bernhard riemann. *Physics Today*, American Institute of Physics., v. 20, n. 12, p. 42, 1967.
- KENNEFICK, D. *No Shadow of a Doubt: The 1919 Eclipse that Confirmed Einstein's Theory of Relativity*. New Jersey: Princeton University Press, 2019.
- LOVEJOY, A. *The Great Chain of Being*. Boston: Harvard University Press, 1936.
- MALINOWSKI, B. *Magic, Science and Religion*. Illinois: Waveland Press, 1948.
- MUNITZ, M. *Theories of the Universe - From Babylonian Myth to Modern Science*. New York: The Free Press, 1957.
- NEUGEBAUER, O. *The Exact Sciences in Antiquity*. Providence, Rhode Island: Brown University Press, 1957.

SOB O SOL DE SOBRAL - UMA EXPERIÊNCIA QUE TRANSFORMOU A FÍSICA E POR CONSEQUÊNCIA A COSMOLOGIA

PRUSTI, T. E. A. The gaia mission. *Astronomy & Astrophysics*, edp sciences, v. 595, p. A1, 2016.

RODRIGUES, J. M. *Entre telescópios e potes de barro: o eclipse solar e as expedições científicas em 1919/Sobral-CE*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Ceará, Brasil, 2012.