

**Doze mitos sobre a Teoria da Relatividade que precisamos superar<sup>++</sup>**

---

*Ricardo Capiberibe Nunes<sup>1</sup>*

Escola Estadual Amélio de Carvalho Baís

*Wellington Pereira de Queirós<sup>1</sup>*

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul

Campo Grande – MS

**Resumo**

*No dia 29 de maio se comemora o centenário do eclipse de 1919 que teria “provado” (ou confirmado) a Teoria da Relatividade Geral “criada” por Albert Einstein em 1915. Essa frase bastante comum apresenta vários problemas conceituais, entre eles a ideia de que teorias podem ser provadas e tem criadores; e que os dados do eclipse foram suficientes para confirmar a Relatividade Geral. Depois de cem anos do eclipse, ainda há muitos mitos que rodeiam a Teoria da Relatividade e a figura de Albert Einstein. Nesse artigo apresentamos cinco mitos sobre a teoria da relatividade especial, três mitos sobre a relatividade geral e quatro mitos sobre Einstein, que são constantes em livros didáticos, livros especializados, jornais e obras de popularização da ciência. Para desconstruir cada mito, fazemos uma apresentação histórica e conceitual, que reflete um exame rigoroso de pesquisa na literatura primária e secundária. O objetivo do trabalho não é minimizar a contribuição de Einstein para a relatividade, mas desconstruir o mito produzido em torno do cientista Albert Einstein e apresentar o Einstein histórico e suas posições científicas, bem como discutir como ocorreu a construção da teoria da relatividade e seus desdobramentos, como o programa de Buracos Negros e Ondas Gravitacionais. Também mostramos que a Relatividade não era a única teoria consistente e não resolveu todos os problemas conhecidos de sua época, assim como a*

---

<sup>+</sup> Twelve myths about Theory of Relativity we must overcome

<sup>\*</sup> Recebido: julho de 2019.

Aceito: junho de 2020.

<sup>1</sup> E-mails: capiberibe@gmail.com; wellington\_fis@yahoo.com.br

*sua aceitação não foi imediata e nem se deu por algum experimento crucial (experimentum crucis).*

**Palavras-chave:** *Teoria da Relatividade; História e Filosofia da Ciência; Albert Einstein; Mitos Científicos; Construção do Conhecimento.*

### **Abstract**

*On May 29, the centenary of the 1919 eclipse is celebrated, which would have “proved” (or confirmed) the General Theory of Relativity “created” by Albert Einstein in 1915. This very common phrase presents several conceptual problems, among them the idea of what theories can be proved and which have creators; and that the eclipse data was sufficient to confirm General Relativity. After a hundred years of the eclipse, there are still many myths surrounding the Theory of Relativity and the figure of Albert Einstein. In this article we present five myths about the theory of special relativity, three myths about general relativity and four myths about Einstein, which are constant in textbooks, specialized books, newspapers and works of popularization of science. To deconstruct each myth, we make a historical and conceptual presentation, which reflects a rigorous examination of research in primary and secondary literature. The objective of the work is not to minimize Einstein's contribution to relativity, but to deconstruct the myth produced over the scientist Albert Einstein and present the historical Einstein and his scientific positions, as well as discuss how the construction of the theory of relativity and its consequences occurred, as the Black Holes and Gravitational Waves program. We also showed that Relativity was not the only consistent theory and did not solve all the known problems of its time, just as its acceptance was not immediate, nor was it due to any crucial experiment (experimentum crucis).*

**Keywords:** *Theory of Relativity; History and Philosophy of Science; Albert Einstein; Scientific Myths; Construction of Knowledge.*

## **I. Introdução**

No dia 29 de maio de 1919 ocorreu um dos eventos mais importantes da história da ciência moderna: o eclipse solar que permitiu que duas equipes inglesas, sob supervisão de Arthur Eddington e Frank Dyson, realizassem fotografias das estrelas próximas ao Sol para

medir o desvio da luz previsto pela Teoria da Relatividade Geral atribuída ao físico alemão-suíço-estadunidense<sup>2</sup> Albert Einstein. Eddington considerou o resultado das medidas como favoráveis a teoria de Einstein e fez ampla divulgação na academia e na imprensa contribuindo para sua popularização e fama. Cem anos depois desse evento, há ainda muitos mitos sobre Einstein e a Teoria da Relatividade. Nesse artigo iremos discutir 12 mitos populares, encontrado em livros didáticos, revistas, séries, filmes e livros de popularização da ciência. Serão cinco mitos associados à teoria da relatividade especial, três mitos associados a relatividade geral e quatro mitos associados a Einstein. Nosso objetivo é desconstruir alguns mitos construídos sobre a Teoria da Relatividade e do cientista Albert Einstein e fazer uma apresentação mais cética e histórica desse importante personagem da história da ciência.

Ao tratar de um estudo histórico é preciso estar ciente de que “o tipo de objetividade da história não é igual ao da objetividade exigida na física” (KRAGH, 2001, p. 63). Na história existe a história propriamente dita que é uma fabricação ou uma cultura sobre fatos e ocorrências no tempo, que não podemos simular em laboratório, mas que conhecemos por meio das fontes. A escrita histórica deve ser sincrônica e diacrônica e esses requisitos são garantidos, em grande parte, pelas fontes que nos narram os fatos (KRAGH, 2001; BLOCH, 2002). As fontes podem mentir? Sim, as fontes podem mentir (KRAGH, 2001; BLOCH, 2002) e é por isso que o historiador deve ser cético e sempre buscar confrontar os relatos e muitas vezes usar outras abordagens para sustentar suas hipóteses. Assim como a ciência, a história também está sujeita a retratação e nunca é acabada.

Quanto ao referencial epistemológico, pode-se dizer que o historiador moderno adota uma tendência epistemológica, mas dificilmente se limita a uma epistemologia (KRAGH, 2001; BLOCH, 2002; PROST, 2008; HARTOG, 2015). Em nosso caso, optamos de forma implícita pela perspectiva epistemológica contemporânea alinhada com os elementos consensuais de natureza da ciência disseminados na literatura (MCCOMAS; ALMAZROA; CLOUGH, 1998; GIL-PEREZ, 2001; MCCOMAS, 2014). Como observa Martins (2014) há uma tensão entre filósofos e historiadores, pois enquanto os filósofos acreditam que o referencial epistemológico deve ser enunciado de forma objetiva antes da pesquisa, o historiador prefere recorrer apenas aos métodos da historiografia para evitar ao máximo a ocorrência de anacronismos. Essa tensão também se verifica nas posturas de educadores e historiadores.

Para o historiador a leitura do passado deve ser sincrônica e diacrônica (THOMPSON, 1983; KRAGH, 2001) isso significa que o historiador deve ler as fontes históricas com os olhos do passado. Essa alegação pode parecer um tanto positivista, pois parece suprimir o papel da hipótese e da interpretação, porém isso é incorreto. A história puramente descritiva não interessa ao historiador, da mesma forma que toda investigação

---

<sup>2</sup> Albert Einstein oficialmente teve três cidadanias: nasceu em Ulm na Alemanha, mas abriu mão da cidadania alemã para não servir as forças armadas. Naturalizou-se suíço, recuperou a cidadania alemã e durante a eclosão da segunda guerra mundial, emigrou para os Estados Unidos e naturalizou-se estadunidense (ISAACSON, 2007).

histórica deve ser conduzida por questões iniciais ou teses. Além disso, há uma ciência na leitura de fontes (PINSKY, 2006; PINSKY; LUCA, 2011) e é claro que essa ciência é conduzida por uma doutrina teórica. Por exemplo, poderíamos desenvolver um estudo histórico com a pergunta: “Qual foi o papel de Poincaré na abordagem de Einstein da Relatividade?” Para responder essa pergunta, o historiador deve recorrer aos documentos, estabelecer categorias a priori ou a posteriori, estabelecer com certa precisão quando Einstein veio a estudar Poincaré e comparar as concepções epistemológicas antes e depois desse contato e assim por diante. A historiografia nos limita a dizer que não podemos trazer concepções que surgiram fora da época do Einstein para seu período. Como Holton (1973, 1975) e seus *themata*, buscamos certas qualidades presentes nas obras dos cientistas e estabelecer certas características de mais destaque.

Assim, diante da discussão realizada, para analisar e responder cada mito, fizemos uma ampla pesquisa de caráter histórico e epistemológico na literatura secundária e também consultamos cópias dos *artigos* originais de Einstein em alemão e as cartas trocadas entre Einstein e seus colegas (literatura primária). Nosso objetivo é contribuir para a ruptura de três atitudes equivocadas comuns no ensino de relatividade (MARTINS, 2006): Redução da História da ciência a nomes, datas e anedotas; concepções errôneas sobre o método científico; uso de argumentos de autoridade.

### **1) Redução da história da ciência a nomes, datas e anedotas**

Trata-se do uso banal da história da ciência e o reducionismo histórico, em podem ser vistos até em livro didático: (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2016, p. 268). Segundo Martins (2006), essa concepção é constituída de ideias distorcidas sobre a natureza do trabalho científico como:

- A ciência é feita por grandes personagens;
- A ciência é constituída a partir de eventos ou episódios marcantes
- Cada alteração da ciência ocorre em uma data determinada;
- Cada fato independe dos demais e pode ser estudado isoladamente.

Todas estas afirmações são insustentáveis, pois, como explica Martins (2016, p. XXV),

*Quem conhece realmente a história da ciência sabe que as alterações históricas são lentas, graduais, difusas; são um trabalho coletivo e não individual e instantâneo, dos “grandes gênios”; é difícil ou impossível caracterizar em uma só frase ou em poucas palavras o que foi uma determinada mudança científica; e há estreita correlação entre acontecimentos de muitos tipos diferentes, o que torna difícil isolar uma “descoberta” e descrevê-la fora de seu contexto.*

## 2) Concepções errôneas sobre o método científico

Alguns autores ainda preservam uma visão algorítmica e rígida da ciência como o produto de algum método científico que sempre conduziria os cientistas a respostas certas e tornaria a tradição científica superior por ser conhecimento provado. No filme *Einstein e Eddington* (2008)<sup>3</sup>, encontramos diversas falas que confirmam essa tendência:

“Toda teoria necessita ser *provada*. Eu sou o homem para *prová-la*.”

“Se Einstein está *certo*, então, uma expedição inglesa terá *provado* isto.”

“Minha teoria é bonita demais para estar errada. Alguém vai *prová-la*.”

Esse tipo de fala também aparece em livros didáticos que abordam a teoria da relatividade geral (TORRES *et al*, 2016, p. 201). Há outros exemplos em sites e vídeos de divulgação científica que alegam como determinadas experiências, chamadas de cruciais, *provaram* a teoria da relatividade especial e a teoria da relatividade geral.

## 3) Uso de argumentos de autoridade

Pelo uso de argumento de autoridade, entendemos como a atitude de “invocar uma pretensa certeza científica baseada em um nome famoso é um modo de impor crenças e de deixar de lado os aspectos fundamentais da própria natureza da ciência” (MARTINS, 2006, p. XXVI), como atribuir o sucesso de uma teoria à genialidade de um cientista. Esse é um aspecto que infelizmente é bastante recorrente quando se trata da figura de Albert Einstein (HAWKING, 2005; BISCUOLA; BÔAS; DOCA; 2016, p. 269). Em uma matéria da revista de popularização da ciência, *Superinteressante*, temos uma matéria intitulada “*E se Einstein não tivesse existido?*” que tem como único objetivo a exaltação de Einstein e uma concepção completamente anacrônica da história. Como exemplo, citamos as seguintes passagens:

*A história do século XX teria sido radicalmente diferente se o físico alemão Albert Einstein (1879-1955) não tivesse nascido nem descoberto, portanto, para espanto geral da humanidade, que matéria e energia são duas faces de uma mesma moeda e que podem ser transformadas uma na outra. A Teoria da Relatividade, exposta pela primeira vez pelo físico alemão em 1905, mas apresentada na íntegra 13 anos mais tarde, reformulou a Física, até então presa aos princípios do inglês Isaac Newton, ainda no século XVII (DIEGUEZ, 2017).*

Todas essas atitudes inadequadas contribuem para formar uma percepção equivocada da natureza da ciência e dos cientistas. Uma aprendizagem inadequada da ciência afasta o estudante do conhecimento científico e fomenta aquilo que se denomina de crença científica.

*Há uma importante distinção entre conhecimento científico e crença científica. Ter conhecimento científico sobre um assunto significa conhecer os resultados*

---

<sup>3</sup> EINSTEIN E EDDINGTON. Direção: Philip Martin. Roteiro: Peter Moffat. [S.l.]: Company Pictures e a BBC, 2008. 1 DVD (89 min), NTSC, color. Título original: Einstein and Eddington. Para mais detalhes sobre essa película, sugerimos consultar: FIMOW. Einstein e Eddington. Disponível em: <https://filmow.com/einstein-eddington-t12568/>. Acesso em: 22 jun. 2020.

*científicos, aceitar esse conhecimento e ter o direito de rejeitá-lo, conhecendo de fato (não através de invenções pseudo-históricas) como esse conhecimento é justificado e fundamentado. Crença científica, por outro lado, corresponde ao conhecimento apenas dos resultados científicos e sua aceitação baseada na crença na autoridade do professor ou do “cientista”. A fé científica é simplesmente um tipo moderno de superstição. É muito mais fácil adquiri-la que o conhecimento científico – mas não tem o mesmo valor (MARTINS, 2006, p. XXIII).*

Nas próximas seções desmistificaremos 12 mitos comuns sobre Teoria da Relatividade e sobre Albert Einstein, tentando promover a reflexão e uma visão mais consistente da natureza da ciência.

## **II. O experimento de Michelson-Morley refutou o éter?**

Um mito bastante popular seria o papel do experimento de Michelson-Morley realizado em 1887. De acordo com alguns autores (BONJORNIO *et al.*, 2016, p. 205; YAMAMOTO; FUKU, 2017, p. 235), o objetivo desse experimento seria provar a existência do éter luminoso.

*Michelson, como a quase totalidade dos físicos da época, não colocava em dúvida a existência do éter, e por isso nunca pensaria em testar a sua existência. O que ele estava tentando fazer, em seus famosos experimentos, era medir a velocidade da Terra através do éter, admitindo o modelo de Fresnel de um éter estacionário (ou seja, que não era arrastado pela própria Terra). O resultado obtido, contrário à expectativa, podia ser interpretado de muitos modos diferentes. Albert Michelson não rejeitou os resultados do experimento, evidentemente, mas adotou uma interpretação que é diferente da relativística, posterior (MARTINS, 1998, p. 266).*

Também destacamos que a hipótese do éter nunca foi falsificada, apenas se convencionou em rejeitá-lo. Portanto, não podemos dizer que ela estava errada.

*Aceitar ou não o éter era uma questão que fugia aos métodos científicos de decisão, pois não podia ser decidida por observações e experimentos. Ou seja: nenhum experimento provou que existia o éter e nenhum experimento provou que ele não existia. Em particular – ao contrário do que se costuma dizer – o experimento de Michelson-Morley não mostrou que o éter não existe (MARTINS, 2015, p. 254-255).*

O historiador Gerald Holton (1969), em um estudo sobre os trabalhos de Einstein sobre a relatividade especial, defende a tese de que o experimento de Michelson-Morley não teve um papel crucial para o desenvolvimento da abordagem da Relatividade Especial de Einstein e a rejeição do éter. A principal alegação de Holton baseia-se no fato de que a literatura estudada por Einstein não continha referência a esse experimento (HOLTON, 1969,

p. 170). Essa hipótese é validada pelo próprio Einstein, que em uma carta a Davenport, datada de 9 de fevereiro de 1954, fez a seguinte declaração:

*No meu próprio desenvolvimento, o resultado de Michelson não teve uma influência considerável. Eu nem lembro se eu o conhecia quando escrevi meu primeiro artigo sobre o assunto (1905). A explicação é que eu estava, por razões de ordem geral, firmemente convencido de como isso [a não existência de movimento absoluto] poderia ser conciliado com nosso conhecimento de eletrodinâmica. Pode-se, portanto, entender por que, na minha luta pessoal, o experimento de Michelson não teve nenhum papel ou, pelo menos, nenhum papel decisivo (EINSTEIN apud HOLTON, 1969, p. 194).*

Contudo, em uma palestra de 1922 proferida por Albert Einstein chamada *How I created de Theory of Relativity (Como eu criei a Teoria da Relatividade)*, cuja transcrição veio a público em 1983, Einstein faz a seguinte confissão:

*Então eu mesmo quis verificar o fluxo do éter em relação à Terra, em outras palavras, o movimento da Terra. Quando pensei pela primeira vez sobre este problema, não duvidei da existência do éter ou do movimento da Terra através dele. Pensei no seguinte experimento usando dois termopares: Configure espelhos de modo que a luz de uma única fonte seja refletida em duas direções diferentes, uma paralela ao movimento da Terra e a outra antiparalela. Se assumirmos que há uma diferença de energia entre os dois feixes refletidos, podemos medir a diferença no calor gerado usando dois termopares. Embora a ideia deste experimento seja muito semelhante à de Michelson, não pus este experimento à prova. [...] Enquanto pensava nesse problema em meus anos de estudante, passei a conhecer o estranho resultado do experimento de Michelson. Logo cheguei à conclusão de que nossa ideia sobre o movimento da Terra em relação ao éter é incorreta, se admitirmos o resultado nulo de Michelson como um fato. Este foi o primeiro caminho que me levou à teoria especial da relatividade. Desde então, passei a acreditar que o movimento da Terra não pode ser detectado por nenhum experimento ótico, embora a Terra esteja girando em torno do Sol (EINSTEIN, 1983, p. 46).*

A respeito dessa nova declaração, parece que devemos rejeitar a hipótese de Holton de que Einstein não conhecia o experimento de Michelson-Morley e contestar a sua carta de 1954. Seja como for, a premissa segundo a qual este experimento não foi um *experimentum crucis* para Einstein continua sendo verdadeira (HOLTON, 1969, p. 195). Em síntese: o experimento de Michelson-Morley não provou a inexistência do éter e, apesar de sua grande importância e impacto, não foi o *experimentum crucis* para o surgimento da relatividade.

### **III. Einstein provou que o éter não existe?**

Alega-se em alguns livros que Einstein teria provado que o éter não existe ou que o éter é incompatível com a teoria da relatividade. No livro *Introduction to Special Relativity*,

de Robert Resnick (1968), encontramos uma Tabela (reproduzida abaixo) que propõe que a teoria de Einstein era a única consistente com todos os fenômenos experimentais de sua época e que qualquer teoria do éter é incompatível com um ou mais experimentos.

Na tabela, ao analisar o éter estacionário com contração de Lorentz, sugere-se ao leitor que há uma incompatibilidade entre a Teoria da Relatividade e as Teorias do Éter, porém isso não é verdade (AUFFRAY, 1998; LOGUNOV, 2004; MARTINS, 2005a, 2005b). Tanto a Teoria da Relatividade de Einstein como a de Lorentz-Poincaré tem como fundamento elementar o grupo de Lorentz  $SO(1,3)$ <sup>4</sup>, criado por Poincaré. Isso significa que todos os resultados quantitativos entre as duas teorias são iguais. Tudo o que a abordagem de Einstein prevê, está previsto na abordagem de Lorentz e Poincaré (LOGUNOV, 2004; MARTINS, 2005a, 2005b, 2012, 2015). A diferença entre a abordagem de Einstein e Lorentz-Poincaré é apenas qualitativa.

Tabela 1 – Comparação entre as teorias de éter, emissão e relatividade especial.

Teoria		Experiências de propagação da Luz							Experiências de outros campos					
		Aberração	Coefficiente de convecção de Fizeau	Michelson-Morley	Kennedy-Thorndike	Espelhos e fontes em movimento	Binários espectroscópicos de De-Sitter	Michelson-Morley usando a luz solar	Variação de massa com velocidade	Equivalência geral de massa-energia	Radiação de cargas em movimento	Decaimento do méson a alta velocidade	Trouton-Noble	Indução unipolar usando imã permanente
Teorias do Éter	Éter estacionário, sem contração	A	A	D	D	A	A	D	D	N	A	N	D	D
	Éter estacionário, contração de Lorentz	A	A	A	D	A	A	A	A	N	A	N	A	D
	Éter ligado a corpos ponderáveis	D	D	A	A	A	A	A	D	N	N	N	A	N
Teorias da Emissão	Fonte Original	A	A	A	A	A	D	D	N	N	D	N	N	N
	Balística	A	N	A	A	D	D	D	N	N	D	N	N	N
	Fonte nova	A	N	A	A	D	D	A	N	N	D	N	N	N
Teoria da Relatividade Especial		A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
<p><i>Legenda.</i> A, a teoria concorda com os resultados experimentais.  D, a teoria discorda dos resultados experimentais.  N, a teoria não é aplicável às experiências.</p>														

Fonte: RESNICK, 1968, p. 37. Tradução nossa.

<sup>4</sup> Um grupo é um conjunto matemático munido de uma operação arbitrária e fechada que é associativa, apresenta elemento neutro e elemento inverso. O  $SO(1,3)$  é o grupo das rotações hiperbólicas infinitesimais em um espaço de 4 dimensões. A cinemática Teoria da Relatividade Especial é a Álgebra de Lie de  $SO(1,3)$ .

O papel que o éter desempenha nas duas teorias é apenas convencional (AUFFRAY, 1998; MARTINS, 2005a, 2005b, 2012, 2015) ou para lembrar Poincaré (1902), uma escolha baseada na comodidade, visto que nenhuma experiência foi capaz de provar a existência ou a inexistência do éter. Pode-se provar (BROWN, 2017) que existe uma incerteza experimental entre as medidas de espaço e de tempo que não pode ser superada (uma espécie de antecedente relativístico do princípio da incerteza). Os defensores da teoria do éter, como Lorentz, acreditavam que o éter poderia existir nesse limite. O próprio Einstein, a partir de 1920, voltou a defender a existência do éter. Zahar (1973a, 1973b) foi um dos pesquisadores que tentou empreender um exame lakatosiano sobre os programas de Einstein e Lorentz (Poincaré), mostrando que a superioridade do programa de Einstein era devido a seu apelo heurístico: ser mais intuitiva (do ponto de vista físico) e mais inteligível. Feyerabend (1974), por outro lado, discorda de Zahar e defende que a escolha foi puramente por fatores externos. Katzir (2015) acredita que, paradoxalmente, o sucesso da abordagem de Einstein deve-se ao fato dela ser mais incompleta que Einstein, o que tornava a teoria mais maleável.

De fato, no artigo de 1905 de Einstein não encontramos nenhuma prova de que o éter não existe. Só há uma passagem em que Einstein menciona o éter:

*A introdução de um <<éter lumífero>> irá se revelar supérflua, visto que na teoria que vamos desenvolver não necessitaremos de introduzir um <<espaço em repouso absoluto>>, nem de atribuir um vetor velocidade a qualquer ponto do espaço vazio em que tenha lugar um processo eletromagnético (EINSTEIN, 1905a, p. 892).*

Em outras palavras, Einstein não refutou o éter, apenas rejeitou o conceito (AUFFRAY, 1998, p. 65). Em uma conferência na Universidade de Leyden, ministrada por Einstein em 5 de maio de 1920, intitulada como “Éter e Teoria da Relatividade”. Einstein assume a existência de um éter, desde que não se associe a ele um estado de movimento.

*De acordo com a teoria da relatividade geral, espaço sem éter é impensável, pois em tal espaço não haveria propagação de luz, nem possibilidade de padrões de espaço e tempo (régua e relógios), nem, portanto intervalos de espaço-tempo no sentido físico (EINSTEIN, 1920).*

Portanto, ainda que não pensemos mais em um éter, Einstein não provou a inexistência do éter, ele apenas considerou, naquela ocasião, que sua imponderabilidade era um argumento suficiente para rejeitá-lo, ou melhor, não se referir a ele. Após 1920, entretanto, Einstein percebeu que a estrutura de um espaço-tempo que se deforma, oscila (propagando ondas gravitacionais) e se comporta como um fluido newtoniano, era semelhante à concepção do éter. Por essa razão ele passou a defender o éter, como podemos ver em algumas de suas conferências (EINSTEIN, 1920, 1922, 1924, 1930).

#### IV. Nada pode viajar mais rápido que a velocidade da luz?

Costuma-se dizer que Einstein postulou que a velocidade da luz no vácuo é a mesma em todos os referenciais inerciais e que a Relatividade Especial prevê que nada pode ir mais rápido que a luz. Estas duas afirmações estão erradas. A primeira, que Einstein postulou a invariância da velocidade da luz, é um erro que aparece em quase todos os livros didáticos e livros textos avançados sobre relatividade, como Resnick (1968), Born (1922), French (1968), Faraoni (2013), e até mesmo o rigoroso estudo de Whittaker (1953) contém esse mal entendido. Uma das poucas exceções são os livros de Pauli (1958) e de Martins (2012). No artigo de Einstein, o segundo postulado é enunciado duas vezes:

*A seguir, elevaremos essa suposição a um postulado (cujo conteúdo chamaremos subsequentemente de "Princípio da Relatividade") e introduziremos o postulado adicional que é apenas aparentemente incompatível com o anterior, a saber, de que a luz, no espaço vazio, se propaga sempre com uma velocidade determinada, independente do estado de movimento da fonte luminosa (EINSTEIN, 1905a, p. 891-892).*

E, mais à frente Einstein apresenta formalmente seu postulado da seguinte forma:

*As seguintes considerações são baseadas no Princípio da Relatividade e no Princípio da Constância da velocidade da luz, ambas as quais definimos da seguinte maneira. [...] 2. Qualquer raio de luz move-se no sistema de coordenadas <<em repouso>> com uma velocidade determinada  $V$ , que é a mesma, quer esse raio seja emitido por um corpo em repouso, quer o seja por um corpo em movimento (EINSTEIN, 1905a, p. 895).*

Contudo, em todas as obras analisadas, o segundo postulado que é apresentado não é o princípio da constância da velocidade da luz, mas o princípio da invariância da velocidade da luz (BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2016, p. 268; GUIMARÃES; PIQUEIRA; CARRON, 2016, p. 189; BORN, 1922, p. 198; FARAONI, 2013, p. 14; FRENCH, 1968, p. 72). Constância e invariância da velocidade da luz são dois conceitos distintos, definidos de forma diferente. Ao se substituir um postulado por outro diferente há um comprometimento da estrutura lógica e racional da teoria. A invariância é um teorema, isto é, uma consequência lógica dos postulados. Historicamente, foi Henri Poincaré o primeiro a propor a invariância da velocidade da luz como uma consequência do Princípio da Relatividade (WHITTAKER, 1953). A invariância da velocidade da luz aparece no artigo de Einstein no quinto parágrafo – Teorema da Adição de Velocidades. Um outro aspecto ligado à invariância da velocidade da luz é a afirmação, equivocada, de que nada pode se deslocar mais rápido que a luz.

O que ocorre é que um corpo material que se propaga com velocidade menor que a velocidade da luz não pode ser acelerado a velocidades iguais ou superiores à velocidade da luz. Por outro lado, não há nada que impeça que uma partícula seja emitida com velocidade

igual à da luz (como o fóton) ou com velocidade superior à da luz. Com efeito, há estudos de partículas com velocidades supraluminais, denominadas de táquions, em concordância com a Teoria da Relatividade como podemos ver em Recami (1986), Fayngold (2002), Newton (1970), Fox, Kuper e Lipson (1970), Narlikar (1978) e Kreisler (1973). Há também fenômenos físicos que não transportam informação e se propagam mais rápido que a luz (MARTINS, 2012):

- O ponto de intersecção de duas réguas quase paralelas;
- Uma mancha luminosa produzida por um farol distante em uma parede;
- Uma sequência de lâmpadas que acendem sucessivamente.

A Relatividade também permite velocidades infinitas (nenhum de seus postulados ou teoremas proíbe esse tipo de vínculo, desde que a velocidade com a informação associada seja finita). Martins (2012, p. 85), usando o Teorema da Adição de Velocidades, demonstra que mesmo que uma velocidade seja infinita, a propagação de informação não o será. Em síntese: Einstein não postulou que a velocidade da luz é invariante, ele deduziu essa propriedade como teorema. Ele também não postulou que nada pode ir mais rápido do que ela, inclusive há estudos de fenômenos superluminais, chamados de fenômenos com elo espacial e que envolvem partículas hipotéticas chamadas de táquions, todos em concordância com a Teoria da Relatividade. Não adentraremos nesse tópico, mas o leitor interessado poderá consultar a obra de fácil leitura “*Faster Than Light: Superluminal Loopholes in Physics*” (HEBERT, 1989).

## V. A luz (radiação eletromagnética) não tem massa?

Uma dúvida bastante recorrente de alunos é sobre a massa da radiação ou da luz. Em fóruns científicos de perguntas e respostas como *Quora*, *Physlink*<sup>5</sup>, *Askamathematician* e o *Curious*<sup>6</sup> (da Universidade Cornell) é comum encontrarmos alunos questionando como a luz pode sofrer ação da gravidade se ela não tem massa. Também é comum encontrarmos entre as respostas e nos livros didáticos e de nível superior que a luz não tem massa de repouso, mas apresenta uma massa relativística, como pode ser visto em Resnick (1968), Eisberg e Resnick (1979) e French (1968).

Todas essas afirmações são problemáticas e podem induzir a um falso raciocínio a respeito da inércia da luz. As duas primeiras respostas parecem concordar que a luz (ou radiação) não tem qualquer tipo de massa, enquanto a terceira resposta contradiz as duas primeiras ao afirmar que a luz não tem massa de repouso, mas apresenta um tipo de massa denominada relativística. Podemos considerar a terceira resposta como a mais satisfatória.

---

<sup>5</sup> Disponível em: <<https://www.physlink.com/education/askexperts/ae180.cfm>>.

<sup>6</sup> Disponível em: <<http://curious.astro.cornell.edu/about-us/140-physics/the-theory-of-relativity/general-relativity/1021-if-photons-have-zero-mass-why-do-they-feel-the-effects-of-gravity-advanced>>.

Contudo há dois pontos que precisam ser esclarecidos: (1) ainda que não faça parte da corrente principal da comunidade científica, há pesquisadores que defendem que a luz tem uma pequena massa de repouso (BASS; SCHRODINGER, 1955; THOMSEN, 1971; GOLDHABER; NIETO, 2010); (2) é possível associar uma massa à luz sem precisar recorrer a argumentos relativísticos (LANGEVIN, 1913; MARTINS, 1989, 2005, 2012). Sobre o desvio da luz em campos gravitacionais, abordaremos a questão quando falarmos do eclipse de 1919. Nesta seção, iremos argumentar para desconstruirmos esses mitos sobre a inércia da luz.

No final do século XIX, foram introduzidos três novos conceitos de massa eletromagnética (LANGEVIN, 1913; MARTINS, 1989, 2005, 2012): (i) a massa cinética, que é quando o conceito de massa é obtido a partir da definição de energia cinética; (ii) a massa maupertusiana de Poincaré, que é obtida por meio da definição de momento linear; (iii) a massa acelerativa que é deduzida a partir do conceito de força e é classificada em massa transversal, se a força atuar perpendicular ao vetor deslocamento do corpo, e massa longitudinal, quando a força atua paralela ao vetor deslocamento do corpo.

Quando James Clerk Maxwell publicou seu *Treatise on Electricity and Magnetism*, em 1873, além da previsão de ondas eletromagnéticas que se propagam com a velocidade da luz, Maxwell também estabeleceu que durante o processo de emissão, reflexão e absorção, a luz aplica uma pressão sobre a superfície. Outra consequência da teoria eletromagnética é que a luz também deveria transportar energia e transmitir momento e não pode ser acelerada no vácuo. Essa última sentença implica que a luz tem uma massa maupertusiana, mas não possui uma massa acelerativa.

Em 1900, Jules Henri Poincaré obteve a expressão da massa maupertusiana para luz. A partir de considerações envolvendo o momento eletromagnético, Poincaré mostrou que durante o processo de emissão e absorção, a energia associada à radiação se comporta como um fluido fictício cuja inércia é dada por  $m = E/c^2$ .

Em 1904, Friedrich Hasenöhrl estudou a inércia de uma caixa perfeitamente refletora cheia de radiação. Sua análise mostrou que uma caixa vazia apresenta menos inércia que uma caixa cheia de radiação. Segundo os cálculos (corrigidos), uma caixa cheia de radiação sofre um aumento de inércia  $m = 4/3 E/c^2$  (MARTINS, 2005a, 2015, p. 143). Em 1905, Max Abraham estudou o mesmo sistema, mas usou como ponto de partida o momento linear total associado à radiação, obtendo o mesmo valor para o aumento da inércia da caixa cheia de radiação (MARTINS, 2005a, 2015). É importante observar que nenhuma dessas considerações permite tirar conclusões sobre o peso da luz ou o peso da caixa. Essa é uma distinção muito importante: até 1907, não podia se considerar a massa inercial e a massa gravitacional como equivalente, principalmente quando se tratava da massa associada à energia e à radiação. Ao se abordar esses dois conceitos, massa inercial e massa gravitacional (associada ao peso), é preciso se tomar certo cuidado para não criar uma confusão conceitual

como infelizmente ocorre na matéria publicada pela revista *Superinteressante*: “Qual é o peso da luz?”<sup>7</sup>, em que os autores associam o conceito de peso ao conceito de inércia.

Todos estes estudos mostram que podemos associar uma massa maupertuisiana à luz. Além disso, todas as nossas considerações sobre a massa não envolvem elementos da teoria da relatividade propriamente dita, mas apenas elementos da teoria eletromagnética. Por isso, embora não seja incorreto, quando afirmamos que a luz tem uma *massa relativística*, devemos ter a cautela de não passar a impressão de que nas teorias pré-relativísticas não se pode associar uma massa à luz. Assim, ao responder a pergunta: a luz tem massa? O mais adequado é responder “depende do tipo de massa. Não faz sentido associar uma massa acelerativa à luz, pois ela não pode ser acelerada (pelo menos no vácuo). Mas pode associar-se à radiação uma massa maupertuisiana” (MARTINS, 2012, p. 188).

Quanto ao fato da luz gravitar, deixaremos esse tópico para mais adiante, quando falarmos do eclipse de 1919. Por enquanto, basta entender que a luz tem um tipo especial de massa inercial.

## VI. Existe equivalência entre massa e energia?

A equação  $E = mc^2$  é bastante conhecida entre físicos e leigos e também interpretada de maneira equivocada. Costuma-se afirmar que esta equação estabelece uma equivalência entre massa e energia ou que se pode converter (transformar) massa em energia e vice-versa. Todas essas afirmações estão equivocadas. Este é um erro tão comum que aparece em livros didáticos (MARTINS, 2012) e até mesmo em livros especializados sobre relatividade, como Resnick (1968), French (1968), Bohm (2014) e Faraoli (2013). Trata-se de um equívoco conceitual, pois como discorre Martins (2012, p. 124):

*Se massa e energia fossem equivalentes, isso significaria que essas palavras representam a mesma coisa, descritas de formas diferentes. Nesse caso, a relação  $E = mc^2$  seria um simples tipo de definição e não seria uma lei física. Ninguém considera, por exemplo, que a equação de conversão de calorias para joules ou de temperatura Celsius para temperatura Fahrenheit seja uma lei física. Se  $E = mc^2$  estabelecesse uma equivalência entre massa e energia, essa relação jamais poderia prever fenômenos nem ser testada experimentalmente, e sua utilidade científica seria muito pequena (MARTINS, 2012, p. 124).*

Além disso, a possibilidade de interconversão entre massa e energia, também não existe:

*Se tanto a massa quanto a energia se conservam, é claro que um não pode se converter ou transformar no outro. Uma forma de energia pode se transformar em*

---

<sup>7</sup> Disponível em: <<https://super.abril.com.br/mundo-estranho/qual-e-o-peso-da-luz/>>.

*outra (por exemplo, energias cinética, elétrica, potencial, calor, etc.). No entanto, a massa não pode se transformar em energia (MARTINS, 2012, p. 124).*

Porém, como objetar o argumento de que esse fato é provado empiricamente em reações nucleares como encontramos em estrelas, onde pequenas quantidades de massa (ou matéria) são “convertidas” em energia? Em geral, trata-se de uma confusão entre conceitos básicos de matéria, massa, energia e radiação.

*Muitas vezes, as pessoas que falam sobre transformação de massa em energia estão confundindo massa com matéria e energia com radiação. Na aniquilação de um elétron e um pósitron temos, inicialmente, matéria (em certo sentido); depois da aniquilação não temos matéria, mas temos radiação. Teríamos assim uma transformação de matéria (massa) em radiação (energia). Na física clássica, a massa era realmente identificada como a quantidade de matéria do corpo. No entanto na teoria da relatividade, o conceito é muito diferente. Se a matéria e a massa fossem o mesmo conceito, não poderíamos falar sobre a variação de massa de uma determinada quantidade de matéria, quando essa matéria é acelerada. Da mesma forma não se deve identificar os conceitos de energia e radiação. A radiação tem energia, mas um corpo material também tem energia (MARTINS, 2012, p. 127).*

Se consultarmos o artigo de 1905 de Albert Einstein, vemos que em momento algum Einstein fala em conversão ou equivalência entre massa e energia. De fato, Einstein (1905b, p. 641) conclui seu artigo fazendo a seguinte observação:

*Se um corpo emite a energia  $L$  na forma de radiação, sua massa diminui em  $L/c^2$ . O fato de que a energia retirada do corpo se torna energia de radiação evidentemente não faz diferença, de modo que somos levados à conclusão mais geral de que a massa de um corpo é uma medida de seu conteúdo energético; se a energia muda por  $L$ , a massa muda no mesmo sentido por  $L/9 \times 10^{20}$ , a energia sendo medida em ergs, e a massa em gramas.*

Outro fato importante é que, apesar de algumas considerações de Einstein sobre a universalidade dessa equação, ela não representa a energia total e nem se trata de uma lei geral, válida para qualquer tipo de sistema físico e todas as formas de energia, como mostrou Planck em 1907.

*A termodinâmica relativística foi desenvolvida por Max Planck, que em 1907 também esclareceu as propriedades relativísticas de sistemas extensos submetidos a forças externas, mostrando que, em vez da relação  $E = mc^2$ , existe uma relação mais geral, que associa a entalpia  $H = E + PV$  de um sistema à sua massa inercial:  $H = mc^2$ . A relação  $E = mc^2$  só é válida para partículas, ou sistemas isolados (que não estão submetidos a pressões ou tensões) e não pode ser aplicada a alguns outros casos, como na análise da energia potencial de uma partícula em um campo externo (MARTINS, 2012, p. 35-36).*

Mesmo o famoso livro *Lições de Física de Feynman* (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008), que é tido como uma referência para o ensino de física básica universitária, não está livre de interpretações conceituais equivocadas sobre a relação massa-energia. Uma análise feita por Ostermann e Ricci (2004, p. 97-98) mostra os diversos equívocos cometidos pelos autores.

Concluindo, mesmo físicos eminentes como Richard Feynman (prêmio Nobel em física) e David Bohm apresentam concepções equivocadas sobre a relação massa-energia. Não há equivalência massa-energia, não há transformação de massa em energia ou vice-versa. Esta equação não é geral, pois não se aplica a sistemas submetidos a tensões e pressões e nem à energia potencial elétrica (MARTINS, 1989). De forma resumida, essa equação deve ser lida: “se a energia total de um sistema isolado é  $E$ , então esse sistema tem uma massa inercial  $m = E/c^2$ ” (MARTINS, 2012, p. 123). Para uma discussão mais aprofundada o leitor deve ver: Born (1922), Pauli (1958) e Martins (1989, 1998, 2005, 2012, 2015).

## VII. O eclipse de 1919 provou a Teoria da Relatividade Geral?

O eclipse de 28 de maio 1919 se tornou um evento importante para a história da ciência, pois foi nessa ocasião que uma comitiva britânica liderada pelos astrônomos reais Arthur Eddington e Frank Dyson realizou medidas do desvio da luz para testar uma das previsões da Teoria da Relatividade Geral. A comitiva fez medidas em duas localizações: na Ilha do Príncipe, no Congo, e em Sobral, no Brasil. Em torno desse evento surgiram três mitos que iremos desconstruir:

### VII.1 Bastava mostrar que a luz sofre uma deflexão gravitacional?

No filme Einstein e Eddington<sup>8</sup>, uma das ideias recorrentes é que uma consequência inédita da Teoria da Relatividade Geral seria o desvio da luz na presença de um campo gravitacional. O filme reforça o senso comum de que bastava verificar, durante o eclipse de 1919, que a luz das estrelas era desviada na presença da massa solar, e isso está incorreto.

*A relatividade geral previa um desvio de 1,74 segundos de arco para a luz que passasse perto da borda do Sol, e desvios proporcionalmente menores para estrelas mais afastadas. Havia também uma previsão não relativística, baseada na teoria corpuscular da luz, que previa um desvio de 0,87 segundos de arco (a metade da previsão relativística). Não se tratava, portanto, apenas de verificar se havia ou não um desvio: era necessário medi-lo com boa precisão (MARTINS, 2015, p. 210).*

Sobre o desvio da luz, Whittaker (1953, p. 180) ainda registra que “a noção de que a luz possui massa gravitacional e que, portanto, um raio de luz de uma estrela seria desviado quando passa perto do sol, estava longe de ser nova, pois foi apresentada em 1801 por Johann

---

<sup>8</sup> Para detalhes, ver nota de rodapé 02.

Georg von Soldner, que calculou que uma estrela vista perto do sol seria deslocada por 0.85 segundo de arco. Em outras palavras, a deflexão da luz não era um efeito inovador como popularmente se diz.

## VII.2 A concordância entre as medidas e a teoria eram suficientes para provar a TRG?

Karl Raimund Popper, em *A Lógica da Pesquisa Científica*, mostrou que uma teoria não pode ser provada por qualquer tipo de experimento. Experimentos têm como objetivo falsificar teorias. À medida que teorias passam por testes experimentais, elas se tornam mais fortes, mas nada garante que um novo experimento não a refute. Do ponto de vista popperiano, é essencial que a teoria possa ser falsificável para ter cientificidade.

Embora a filosofia da ciência tenha superado vários aspectos da epistemologia popperiana, em 1919, o conceito de ciência, principalmente alemão, tinha um forte componente positivista. Mas essa afirmação popperiana de que uma teoria não pode ser provada por qualquer tipo de experimento é suficiente para desconstruir o mito de que o eclipse de 1919 provou a Teoria da Relatividade Geral. Mesmo que a nossa afirmação seja escrita como: “a concordância entre as medidas e a teoria eram suficientes para provar a TRG”, ela ainda continua sendo anacrônica, do ponto de vista histórico.

Einstein propôs três fenômenos como testes experimentais da Teoria da Relatividade Geral: uma deflexão de um raio de luz ao passar próxima ao Sol com um valor estimado de 1,74 segundo de arco; a precessão do periélio da órbita do planeta Mercúrio e o desvio das raias espectrais para o vermelho (*redshift* gravitacional). Do ponto de vista empírico, para que houvesse uma confirmação da teoria, ela teria que apresentar boa concordância com estas três previsões. O aspecto em que a teoria apresentava melhor concordância com o experimento era o movimento de precessão do periélio de Mercúrio, mas havia explicações alternativas para esse desvio (WHITTAKER, 1953). Quanto ao teste do eclipse de 1919, a princípio parece que eles confirmam a teoria:

*A predição de Einstein foi testada por duas expedições britânicas enviadas aos lugares onde estava prevista a ocorrência do eclipse solar de maio de 1919, que encontraram para a deflexão os valores  $1''.98 \pm 0''.12$  e  $1''.61 \pm 0''.30$  respectivamente, então a predição foi considerada como confirmada observacionalmente: e essa opinião foi fortalecida pelos primeiros relatos sobre o eclipse australiano de 21 de setembro de 1922. Três expedições diferentes encontraram para a mudança no limiar solar os valores  $1''.72 \pm 0''.11$ ,  $1''.90 \pm 0''.2$  e  $1''.77 \pm 0''.3$ , todos os três resultados diferem do valor predito de Einstein por menos do que seus erros prováveis estimados (WHITTAKER, 1953, p. 180).*

Para chegar a esses dados, a expedição britânica precisou fazer correções sobre a medida de Sobral, pois havia indícios que as altas temperaturas de Sobral, no dia do eclipse, poderiam ter comprometido a sensibilidade do telescópio (WHITTAKER, 1953; MEHRA, 1974; GLYMOUR; EARMAN, 1980; MEHRA, 1974, MARTINS, 2015).

*Assim, graças a esse estratagema, as observações foram consideradas como uma importante corroboração da teoria da relatividade geral, e foi assim que os astrônomos ingleses apresentaram esses resultados. Na época os astrônomos que estudaram o trabalho consideraram aceitável desprezar os resultados obtidos com o telescópio “defeituoso”. Até hoje há discussões sobre se Eddington tinha o direito de ignorar esses dados, na época (MARTINS, 2015, p. 213).*

Curiosamente, o mesmo problema na análise dos dados ocorreu em eclipses posteriores:

*Um reexame das medidas de 1922 deu cerca de  $2''.2$ : no eclipse de Sumatra de 1929 a deflexão foi encontrada em  $2''.0$  a  $2''.24$ : e no eclipse brasileiro de maio de 1947, o valor de  $2''.01 \pm 0''.27$  foi obtido: embora não deva ser considerado impossível que as consequências da teoria de Einstein possam, em última instância, ser conciliadas com os resultados da observação, deve-se dizer que na época presente (1952) há uma discordância (WHITTAKER, 1953, p. 180).*

Mesmo que ignoremos os problemas e a análise e consideremos que os valores aferidos são consistentes com os valores previstos por Einstein, eles ainda não poderiam ser considerados como um teste crucial (*experimentum crucis*).

*Havia outro problema. Mesmo se todas as observações de 1919 tivessem confirmado exatamente a previsão da relatividade geral, essa teoria não podia ser aceita, na época, porque existia outro teste diferente que havia sido realizado e que tinha dado resultados negativos. A teoria previa que os comprimentos de onda das raias escuras observadas no espectro (red shift gravitacional). Era um efeito fácil de testar, mas as observações não mostraram o desvio previsto. Portanto nessa época, existia uma importante refutação da relatividade geral (MARTINS, 2015, p. 213).*

Whittaker (1953) ainda aponta que mesmo se os testes dessa terceira previsão fossem positivos, ainda poderia se contestar se eles eram uma confirmação da teoria:

*Um terceiro teste foi o deslocamento para o vermelho das linhas espectrais emitidas em um forte campo gravitacional. Isso, no entanto, foi, como vimos, explicado antes que a Relatividade Geral fosse descoberta, e, propriamente falando, não constitui um teste disso em contradição com outras teorias. Em qualquer caso, o efeito observado no que diz respeito às linhas solares é complicado por outros fatores. Com relação às linhas estelares, o maior efeito pode ser esperado de estrelas de grande densidade. Agora Eddington mostrou que numa certa classe de estrelas, as "anãs brancas", os átomos perderam todos os seus elétrons, de modo que apenas os núcleos permanecem: e sob a influência do campo gravitacional, os núcleos são agrupados tão firmemente que a densidade é enorme. A companheira de Sírius é uma estrela desta classe: seu raio não é conhecido com precisão, mas a estrela pode ter uma densidade 53.000 vezes maior do que a da água, caso em que o*

*deslocamento para o vermelho de suas linhas seria cerca de 30 vezes o previsto para o Sol. A comparação da teoria com a observação do deslocamento para o vermelho pode, no entanto, dificilmente ser dito que fornece um teste quantitativo da teoria* (WHITTAKER, 1953, p. 180-181).

Portanto, em 1919, nem o eclipse e nenhum dos experimentos era suficiente para confirmar a Teoria da Relatividade Geral. A sua aceitação veio progressivamente, envolveu fatores sociais, políticos e propagandísticos (WHITTAKER, 1953; MEHRA, 1974; EARMAN; GLYMOUR; 1980; MARTINS, 2015). Arthur Eddington, que possuía uma excelente retórica, atuou como propagandista da teoria de Einstein, tornando-a popular entre o público leigo e entre os acadêmicos. Esse é um aspecto que mostra que o progresso da ciência depende de fatores tanto internos como externos. Essa percepção é compartilhada pelo historiador da ciência Brush (1999) o qual destaca que a consolidação da Teoria da Relatividade Geral ocorreu devido a três fatores: (i) previsões empíricas e explicações; (ii) fatores psicológicos e sociais; (iii) formalismo matemático.

### **VII.3 As medidas realizadas em Sobral foram usadas para provar (confirmar) a TRG?**

Como vimos, a comissão britânica organizada por Eddington e Dyson realizou medidas na Ilha do Príncipe, no Congo, e em Sobral, no Brasil. Eddington e Dyson acompanharam a expedição que foi para o Congo e Andrew Cromellin coordenou a equipe que foi para o Brasil. No eclipse de maio de 1919, novas medidas sobre a deflexão da luz foram realizadas no Brasil, e foi obtido um valor de  $2''. \pm 0''.27$  que está acima do previsto, mas dentro do erro (WHITTAKER, 1953, p. 180). Esse segundo eclipse raramente é citado em obras didáticas ou de popularização da ciência brasileira.

No filme Einstein e Eddington, não há qualquer menção sobre a expedição ao Brasil e por uma razão muito simples: o aparelho que realizou fotografias do eclipse em Sobral foi considerado defeituoso e rejeitado para a “confirmação” da teoria. Entretanto livros didáticos, revistas e livros de popularização da ciência nacionais, costumam enfatizar como o Brasil participou da “comprovação” de uma das teorias mais importantes do século XX.

Uma matéria da revista Galileu traz o seguinte título: “A história do eclipse de Sobral (CE) que comprovou a Teoria da Relatividade”<sup>9</sup>. Esse título é problemático por três razões: (i) como vimos anteriormente, o eclipse de 1919 não provou ou comprovou a Teoria da Relatividade Geral. (ii) Embora Sobral tenha sido um dos locais escolhidos pela comitiva britânica, o aparelho foi afetado pelas condições meteorológicas, principalmente a alta temperatura, e era necessário calcular o erro propagado por esse efeito para corrigir as medidas. (iii) Se os dados obtidos em Sobral fossem analisados sem aplicar as correções, mencionadas no item (ii), havia uma tendência de confirmação para a previsão de Soldner.

---

<sup>9</sup> Disponível em: <<https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/10/historia-do-eclipse-de-sobral-ce-que-comprovou-teoria-da-relatividade.html>>.

Na Ilha do Príncipe, a grande dificuldade enfrentada pela expedição foram as condições meteorológicas. O tempo estava parcialmente nublado, o que poderia comprometer todo o experimento. Já no Brasil, o principal problema foram as altas temperaturas. O “calor” poderia dilatar os aparelhos, comprometendo as medidas (EARMAN; GLYMOUR, 1980; MARTINS, 2015). Por isso, foi preciso estimar qual foi o impacto das altas temperaturas no aparelho para se corrigir as medidas. Apesar destas intercorrências, as duas expedições conseguiram realizar as medidas necessárias.

O resultado obtido em Sobral para o desvio das estrelas era de  $0''97$ , que estava muito mais próximo da previsão de Soldner que a de Einstein (MARTINS, 2015). Se o experimento de Sobral fosse considerado isoladamente e negligenciando o efeito das altas temperaturas sobre os aparelhos, ele seria compreendido como uma refutação da Teoria da Relatividade Geral. Porém, corrigindo os valores discrepantes obtidos em Sobral e considerando em conjunto com as medidas feitas na Ilha do Príncipe, há uma concordância razoável com os valores previstos pela Relatividade Geral (MARTINS, 2015). Alguns pesquisadores questionavam os métodos de correção das medidas. Atualmente, considera-se essas correções satisfatórias, pois, posteriormente, foram corroboradas por outras experiências mais precisas, porém, no contexto de 1919, ainda havia dúvidas (EARMAN; GLYMOUR, 1980). Em síntese, o eclipse de Sobral foi um evento importante para a consolidação da Teoria da Relatividade Geral, mas como qualquer experiência física, não pode ser considerada isoladamente e nem como condição suficiente (CHALMERS, 1993, 1994).

## **VIII. A Teoria da Relatividade Geral explicou todas as anomalias astronômicas?**

A Teoria da Relatividade Geral é celebrada pelo seu sucesso em explicar “a precessão do periélio de Mercúrio”. Mas, como afirmou Whittaker (1953), havia outras formas satisfatórias de se explicar esse fenômeno e outras anomalias (desigualdades) astronômicas que, inclusive, a Teoria da Relatividade Geral não forneceu explicação e até hoje permanecem como problemas em aberto. Há dois problemas astronômicos que a Relatividade Geral é incapaz de resolver (MARTINS, 1999): O movimento anômalo dos nós de Vênus e as flutuações irregulares no movimento da Lua. Vejamos:

### **VIII.1 A teoria explicou o movimento anômalo dos nós de Vênus e Mercúrio?**

Em astronomia denominam-se de nós as intersecções entre a órbita do planeta e o plano da eclíptica (MARTINS, 1999). Esse fenômeno foi descoberto por Newcomb em 1895 e, assim como a anomalia do periélio da órbita de Mercúrio, tratava-se de uma divergência à lei da gravitação universal (WHITTAKER, 1953; WALTER, 2007). Em 1905, Poincaré desenvolveu a primeira formulação relativística da gravitação em que ele obteve uma nova expressão para a força gravitacional (KATZIR, 2005; WALTER, 2007). A lei de Poincaré para a gravitação apresentava infinitas soluções e, variando-se os parâmetros seria possível

explicar qualquer anomalia, o que a tornava infalsificável<sup>10</sup>. Porém, a grande razão para sua rejeição era o fato de que o modelo gravitacional de Poincaré não era uma teoria do campo, que a partir da primeira década do século XX havia se tornado um paradigma padrão (KATZIR, 2005; WALTER, 2007). Esperava-se que a nova teoria do campo gravitacional, que alcançou seu auge com Albert Einstein e David Hilbert, pudesse explicar as discrepâncias descobertas por Newcomb, mas elas não o fizeram (WHITTAKER, 1953; MARTINS, 1999).

### **VIII.2 A teoria explicou as flutuações irregulares no movimento da Lua?**

Desde o século XIX sabia-se que a Lua apresentava um movimento irregular, incompatível com a lei da gravitação universal de Newton (WHITTAKER, 1953; MARTINS, 1999). A teoria mais bem sucedida na explicação desse fenômeno foi a Teoria da Absorção Gravitacional, que tem suas origens no século XVIII com os trabalhos de George-Louis Le Sage (WHITTAKER, 1953; MARTINS, 1999; EDWARDS, 2002). A teoria da absorção era uma forte concorrente para relatividade, pois em 1912, Kurt Bottlinger, usando essa teoria, conseguiu explicar as flutuações irregulares da lua e oito anos depois, em 1920, o respeitado físico experimental Quirino Majorana alegou ter confirmado a absorção gravitacional pela matéria. (MARTINS, 1999; EDWARDS, 2002). O problema da teoria da absorção era torná-la compatível com a eletrodinâmica de Lorentz (WHITTAKER, 1953, p. 149-150).

É possível que quando Poincaré tentou conciliar a gravitação com o princípio da relatividade ele estava a par da tentativa de Lorentz, e por isso preferiu desenvolver um novo programa de gravitação a usar as teorias de absorção disponíveis (WALTER, 2007). A Teoria da Relatividade Geral também não resolvia o problema e continuava incompatível com a teoria da absorção (MARTINS, 1999). Em 1919, Einstein supôs que as flutuações da Lua poderiam ser explicadas como efeito das marés. Porém Albert von Brunn mostrou que o efeito previsto seria 30 vezes menor do que o medido, erro que Einstein prontamente reconheceu (MARTINS, 1999). Esse problema foi “solucionado” de uma maneira bastante curiosa. Até 1960, o tempo astronômico era medido tendo como base o movimento da Lua, quando se adotou como tempo astronômico, o tempo das efemérides. Assim, o problema da flutuação irregular da Lua perde a pertinência e “desaparece” (MARTINS, 1999).

Em conclusão, a Teoria da Relatividade Geral “resolveu” (ou melhor, forneceu uma nova explicação) para a anomalia do periélio de Mercúrio, mas não foi bem sucedida em resolver o movimento anômalo dos nós de Mercúrio e de Vênus e as flutuações da Lua, problemas que ainda continuam em aberto.

---

<sup>10</sup> A equação de Poincaré apresenta um parâmetro arbitrário e por isso é sempre possível escolher um valor para esse parâmetro de forma que sempre exista concordância entre os resultados experimentais.

## IX. A Teoria Relatividade Geral é compatível com os princípios de conservação?

Embora não exista uma regra geral que defina o conteúdo de uma boa teoria física, há alguns aspectos que se espera que toda teoria satisfaça. Entre essas características, é que ela seja compatível com os princípios de conservação, em particular, a conservação da energia e dos momentos linear e angular. Essa é uma característica que alguns “divulgadores da ciência”, como Marcelo Gleiser (1997), acreditam que é satisfeita pela Teoria da Relatividade Geral, o que, na verdade, é um mito.

Para entender essa questão devemos compreender um problema mais antigo: a energia é fonte de gravitação? Como vimos, em 1900, Poincaré mostrou que era possível atribuir uma inércia à energia eletromagnética e, em 1904 e 1905, Hasenöhrl e Abraham mostraram que uma caixa espelhada cheia de radiação sofreria um aumento de sua inércia. Nenhum desses experimentos permitia tirar conclusões sobre o peso da energia ou da luz. Essa questão só seria resolvida em 1907 por Eötvös que mostrou experimentalmente que a inércia da energia, incluindo a potencial gravitacional, contribui para o peso do sistema: (WHITTAKER, 1953, p. 151-152; NOVELLO, 2006, p. 41).

Em 1916, Einstein escreveu um artigo intitulado *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* (*Os fundamentos da Teoria da Relatividade Geral*) (EINSTEIN, 1916a). Nesse trabalho, Einstein tenta criar um segundo “tensor” para a energia gravitacional e, usando o tensor momento-energia-tensão, ele tenta estabelecer as leis de conservação da energia e dos momentos linear e angular (EINSTEIN, 1916a). Einstein provou que o tensor momento-energia-tensão e o seu “tensor” gravitacional satisfaziam a uma identidade que Einstein declarou como sendo a lei de conservação (EINSTEIN, 1916a). Em 1917, Félix Klein escreveu uma carta para Einstein alertando que uma identidade não garante uma lei de conservação. Einstein respondeu prontamente a Klein, mas deu pouca importância às suas observações (BRADING, 2010, p. 126-127).

Einstein passou os próximos anos tentando construir esse tensor de energia-momento total. Contudo, ele apenas conseguiu produzir um pseudo-tensor de energia gravitacional, isto é, é sempre possível construir um referencial em que a energia e momento sejam tornados iguais a zero (WEINBERG, 1972; MEHRA, 1974; LANDAU; LIFSHITZ, 1980). Noether investigou mais a fundo esse problema, a partir do pressuposto de autointeração do campo gravitacional. Sua análise levou ao desenvolvimento das *correntes de Noether*. (BRADING, 2000, p. 131)

A conclusão geral de Emmy Noether é que é impossível criar uma teoria que seja covariante, isto é, válida para todos os referenciais e sistemas de medidas, compatível com o princípio da conservação de energia e dos momentos linear e angular (MEHRA, 1974; BRADING, 2000). Na Teoria da Relatividade Geral só é possível estabelecer a conservação dessas grandezas localmente, pois nessas condições, o pseudo-tensor gravitacional se comporta como um tensor verdadeiro (WEINBERG, 1972; MEHRA, 1974; LANDAU; LIFSHITZ, 1980). O único tensor que é conservado globalmente é o tensor energia-momento-

tensão (MARTINS, 1998). Outras divergências incluem problema da rotação das galáxias que levou à suposição da matéria escura e cuja teoria MOND<sup>11</sup> emergiu como uma alternativa à suposição de existência de matéria escura (HORVATH, J. *et al*, 2011). Além disso, recordamos que a energia e os momentos linear e angular não se conservam na Teoria da Relatividade Geral e esse é um problema ainda em aberto.

## X. Einstein foi o primeiro a prever a existência de ondas gravitacionais?

No dia 14 de setembro de 2015, foi anunciada a descoberta experimental de ondas gravitacionais. Essa descoberta repercutiu tanto na mídia como nos meios acadêmicos e, em 2017, o Prêmio Nobel de Física foi concedido a Rainer Weiss, Kip Thorne e Barry Barish por suas participações e contribuições na detecção de ondas gravitacionais<sup>12</sup>. Entre as principais manchetes encontramos: “Ciência confirma a teoria das ondas gravitacionais de Albert Einstein”<sup>13</sup>, “Após 100 anos, cientistas comprovam ondas gravitacionais de Einstein”<sup>14</sup>, “Cientistas detectam pela terceira vez ondas gravitacionais previstas por Einstein”<sup>15</sup> e “Descoberta histórica da ciência confirma o que Einstein constatou há muitos anos”<sup>16</sup>. Na Wikipédia, em português, no verbete “Onda Gravitacional”<sup>17</sup>, encontramos um texto completamente anacrônico e com erros de tradução, o que reforça a sua fama de fonte não confiável. No texto da enciclopédia, encontramos uma descrição da história das ondas gravitacionais, que mostra que Einstein não foi o primeiro a prever ondas gravitacionais e que sua previsão não era definitiva. O texto parece ter sido traduzido usando um software de linguagem, já que a construção é bastante confusa e algumas palavras ora são traduzidas, ora são mantidas em seu original, como no caso da revista *Physical Review* que em certa parte do texto foi inadvertidamente traduzida como revista *Revisão Física*.

---

<sup>11</sup> A Teoria MOND (*Modified Newtonian Dynamics*, em tradução livre: Dinâmica Newtoniana Modificada), “trata-se de uma proposta introduzida por Mordehai Milgrom na década de oitenta com o objetivo de explicar a dinâmica de sistemas gravitacionais, que até então não era explicada somente pela teoria newtoniana. Isto porque, quando observamos a curva de rotação de galáxias e as altas velocidades nos aglomerados de galáxias verificamos que é necessária uma quantidade de massa maior do que aquela observada para explicar a dinâmica desses sistemas. Este é o problema da matéria escura (VELTEN, 2008, p. 3314-01).

<sup>12</sup> O sociólogo Harry Collins em “Gravity’s Shadow: The Search for Gravitational Waves” (2004), faz um resgate histórico sobre as tentativas de detecção de ondas gravitacionais no século XX.

<sup>13</sup> Disponível em: <[https://brasil.elpais.com/brasil/2016/02/11/ciencia/1455201194\\_750459.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2016/02/11/ciencia/1455201194_750459.html)>.

<sup>14</sup> Disponível em: <<http://curiosamente.diariodepernambuco.com.br/project/apos-100-anos-cientistas-comprovam-ondas-gravitacionais-de-einstein/>>.

<sup>15</sup> Disponível em: <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/cientistas-detectam-pela-terceira-vez-ondas-gravitacionais-previstas-por-einstein.ghtml>>.

<sup>16</sup> Disponível em: <<https://canaltech.com.br/ciencia/cientistas-confirmam-existencia-das-ondas-gravitacionais-de-einstein-57777/>>

<sup>17</sup> Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Onda\\_gravitacional](https://pt.wikipedia.org/wiki/Onda_gravitacional)>.

Vejamos porque Einstein não foi o primeiro a prever ondas gravitacionais. O conceito de onda gravitacional não depende dos detalhes da teoria, apenas da restrição de que a gravidade se propague a uma velocidade limitada (WEINBERG, 1972; MARTINS, 1999). Laplace, em 1829, mostrou que a lei da gravitação universal exigia que as interações gravitacionais fossem instantâneas ou se propagassem na ordem de 1 milhão de vezes mais rápida que a velocidade da luz. Contudo, como mostra Whittaker (1953), a aceitação da teoria de Newton não era consensual. No século XVIII, Le Sage propôs um modelo alternativo de gravitação baseado na absorção gravitacional pela matéria, cujo modelo daria origem à Teoria da Absorção Gravitacional (MARTINS, 1999; EDWARDS, 2002). A teoria previa que a luz deveria viajar com velocidade finita em ondas gravitacionais.

Em 1900, Lorentz discutiu um modelo de teoria gravitacional, em concordância com a eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz, usando a teoria da absorção. Porém, sua conclusão foi que os resultados obtidos eram inadmissíveis (WHITTAKER, 1953). Assim, o programa da Teoria da Absorção se provou incompatível com programa da Teoria da Relatividade, tendo sido desenvolvido como uma teoria paralela. A Teoria da Absorção apresentou dois momentos bastante importantes: em 1912, o físico Kurt Bottlinger explicou as flutuações irregulares da lua como uma consequência do processo de absorção da gravidade (MARTINS, 1999). Em 1920, o físico italiano Quirino Majorana realizou experimentos bastante delicados, em que alegou ter confirmado a absorção gravitacional pela matéria e a existência de *ondas gravitacionais* (MARTINS, 1999; EDWARDS, 2002).

Em 1905, Henri Poincaré concluiu a covariância de Lorentz para todo eletromagnetismo e começou a verificar quais seriam suas implicações na gravitação (POINCARÉ, 1906; KATZIR, 2005; WALTER, 2007). Como Laplace havia mostrado que a gravitação deveria se propagar de forma instantânea ou um milhão de vezes mais rápido que a luz e Lorentz mostrou que a eletrodinâmica de Maxwell-Lorentz era incompatível com a Teoria da Absorção, a princípio era possível violar o princípio da relatividade e garantir a sincronização absoluta de relógios (POINCARÉ, 1906; KATZIR, 2005; WALTER, 2007). Poincaré buscou pequenas modificações na lei de Newton, que mantivessem os resultados semelhantes para aproximações de primeira ordem, mas que acomodassem o princípio da relatividade (POINCARÉ, 1905, 1906; KATZIR, 2005; WALTER, 2007). Poincaré mostrou que havia infinitas possibilidades, deduziu duas equações com análogos eletrodinâmicos e concluiu que toda a transmissão gravitacional deveria ocorrer através de ondas gravitacionais que se propagam com a velocidade da luz (POINCARÉ, 1905, 1906; KATZIR, 2005; WALTER, 2007). Minkowski e Sommerfeld também desenvolveram um programa relativístico que fosse covariante em Lorentz. Todas essas abordagens tinham em comum a previsão de ondas gravitacionais (WALTER, 2007).

Com o desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral, também sugeriram novas previsões da existência de ondas gravitacionais. Em 1911, Max Abraham propôs o uso do intervalo relativístico e uma generalização da equação da Poisson, com uma quarta

coordenada temporal (MEHRA, 1974). Em 1912, Gunnar Nordström tentou desenvolver um modelo tendo como postulado essencial a constância da velocidade da luz (MEHRA, 1974). Nordström inferiu que a variação da massa gravitacional de um corpo deveria ser uma função exponencial do potencial gravitacional e da velocidade da luz no vácuo (MEHRA, 1974). Nesse mesmo trabalho, o pesquisador analisou a proposta de Abraham de generalização da equação de Poisson e descobriu que elas teriam como consequência a produção de ondas gravitacionais no espaço-tempo (MEHRA, 1974).

Em 1915, David Hilbert (20 de novembro) e Albert Einstein (25 de novembro) apresentaram as equações aceitas da Teoria da Relatividade Geral. Ainda não existia uma previsão de ondas gravitacionais de Einstein. Isso só ocorreria em junho de 1916, quando Einstein publicou um artigo chamado *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation (Integração aproximada das equações de campo da gravitação)* (EINSTEIN, 1916). Nesse artigo, Einstein estuda o campo fraco de um corpo esférico sem carga e sem rotação e obtém três equações aproximadas que descrevem a transmissão de uma onda gravitacional (EINSTEIN, 1916). Em 1922, o astrônomo inglês Arthur Eddington publicou um importante trabalho, *The propagation of Gravitational waves (A propagação das ondas gravitacionais)* (EDDINGTON, 1922), em que ele mostrou que duas das três equações obtidas por Einstein eram consequências da escolha do referencial e que somente uma das equações, conhecida como Transversalmente-Transversal, era válida para todos os sistemas de coordenadas (KENNEFICK, 2007; CERVANTES-COTA; URIBARRI; SMOOT, 2016).

Mesmo que as ondas gravitacionais fossem uma consequência lógica da Teoria da Relatividade Geral, Einstein passou a objetar a sua existência, pois ele acreditava ter provado junto a Nathan Rosen que elas implicariam em pontos singulares no espaço-tempo (EINSTEIN; ROSEN, 1935). Howard P. Robertson criticou o trabalho de Einstein e Rosen, mostrando que as singularidades que eles obtiveram eram fictícias (matemáticas) e dependiam apenas do sistema de coordenadas adotado (KENNEFICK, 2007; CERVANTES-COTA; URIBARRI; SMOOT, 2016). A princípio Einstein não reconheceu as críticas de Robertson, mas seu colaborador Leopold Infeld o fez mudar de ideia (KENNEFICK, 2007; CERVANTES-COTA; URIBARRI; SMOOT, 2016).

Uma importante crítica às ondas gravitacionais deduzidas por Einstein surgiu a partir da demonstração do Teorema de Birkhoff por Jebsen, em 1921, e Birkhoff, em 1923 (JOHANSEN; RAVNDAL, 2005). Esse teorema estabelece que qualquer solução com simetria radial das equações de campo do vácuo (equações da Teoria da Relatividade Geral) deve ser estática, e no limite assintótico deve corresponder à métrica de Minkowski. Isto implica que toda solução exterior deve ser dada pela métrica de Schwarzschild. Outra consequência é que soluções com simetria radial, como a estudada por Einstein em 1916, *não emitem ondas gravitacionais*. Somente soluções com simetria *axial* como as soluções aproximadas de Lense-Thirring e as soluções exatas de Kerr e Kerr-Neumann (GRIFFITHS; PODOLSKY, 2009) emitem radiação gravitacional.

Portanto, a previsão de ondas gravitacionais por Einstein não era algo inovador em 1916 e já aparecia em diversos trabalhos e teorias alternativas. Além disso, o Teorema de Birkhoff mostra que as ondas gravitacionais detectadas em 2015, não são as previstas por Einstein, pois as soluções de simetria radial, estudadas por Einstein, não emitem ondas gravitacionais.

## XI. Einstein previu a existência de buracos negros?

Outro mito associado a Einstein diz respeito aos buracos negros. No dia 10 de abril de 2019, a National Science Foundation (NSF) anunciou a primeira imagem de um buraco negro. Trata-se do buraco negro supermassivo da galáxia de Messier 87. Neste mesmo dia, um dos *uma das expressões mais postadas* do *twitter* foi *Einstein estava certo*<sup>18</sup>. Na mídia, encontramos diversas matérias com esse título: “Einstein estava certo”<sup>19</sup> apareceu na revista *Isto É*, seguido pela legenda: “a primeira foto da história de um buraco negro *comprova que o genial físico alemão mais uma vez acertou ao prever*, em sua teoria, a existência de um dos mais singulares astros do universo”; o Instituto Humanitas Unisinos postou: “Imagem de buraco negro prova (mais uma vez) que Einstein estava certo”<sup>20</sup>. O *El País* noticiou que “Imagem de buraco negro prova (mais uma vez) que Einstein estava certo”<sup>21</sup>. O site da Globo (G1) anuncia a descoberta de forma mais comedida: “Parece que Einstein acertou mais uma vez: análise de imagem inédita de buraco negro levou 2 anos”<sup>22</sup>. Por fim, citamos o anúncio encontrado na página *Portal do Astrônomo*: “Primeira imagem de um buraco negro confirma a Teoria da Relatividade de Einstein”<sup>23</sup>.

Não há dúvidas de que a obtenção da imagem de um buraco negro, usando o algoritmo concebido por Katie Bouman, foi uma das descobertas mais importantes da história da ciência, assim como a detecção de ondas gravitacionais em 2015, porém, todas essas manchetes cometem um erro bastante grave: elas afirmam que Einstein previu a existência de buracos negros.

Einstein não fez a previsão de buracos negros e, na verdade, foi um dos principais objetos desse programa. Para entendermos a questão, precisamos recorrer à história do

---

<sup>18</sup> Uma das razões para essa *hashtag* ter se tornado tão popular está associada ao autoproclamado filósofo Olavo de Carvalho. Recentemente, uma declaração de Carvalho de que Einstein e Newton eram fraudes, viralizou nas redes sociais. A *hashtag* Einstein estava certo era uma provocação.

<sup>19</sup> Disponível em: <<https://istoe.com.br/einstein-estava-certo/>>.

<sup>20</sup> Disponível em: <<http://www.ihu.unisinos.br/78-noticias/588334-imagem-de-buraco-negro-prova-mais-uma-vez-que-einstein-estava-certo>>.

<sup>21</sup> Disponível em: <[https://brasil.elpais.com/brasil/2019/04/10/ciencia/1554891419\\_402732.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2019/04/10/ciencia/1554891419_402732.html)>.

<sup>22</sup> Disponível em: <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2019/04/10/parece-que-einstein-acertou-mais-uma-vez-analise-de-imagem-inedita-de-buraco-negro-levou-2-anos.ghtml>>.

<sup>23</sup> Disponível em: <<https://portaldoastronomo.org/2019/04/primeira-imagem-de-um-buraco-negro-confirma-a-teoria-da-relatividade-de-einstein/>>.

programa de buracos negros. Por uma questão de síntese, não abordaremos os buracos negros clássicos, que foram previstos por John Mitchell como uma consequência da lei da gravitação universal (NICOLSON, 1983). Focaremos apenas nos buracos negros relativísticos.

Em 1915, logo após as publicações de Hilbert e Einstein das equações de campo da teoria da relatividade geral, o físico-matemático Karl Schwarzschild e o astrônomo Johannes Droste encontraram a primeira solução exata para as equações de campo. Inicialmente Einstein ficou bastante satisfeito com a solução de Schwarzschild, tendo escrito, em 1916, uma carta congratulando Karl Schwarzschild pelo seu trabalho. Infelizmente, Schwarzschild não teve a oportunidade de aprofundar sua descoberta, pois faleceu em 11 de maio de 1916, em decorrência de uma doença de pele que se manifesta por bolhas líquidas que descolam a epiderme, conhecida por pênfigo (DIEKE, 1975).

Com a popularização da Teoria da Relatividade Geral, a partir de 1919, revisões foram feitas sobre as equações de campo e as soluções de Schwarzschild-Droste. Nessa ocasião, descobriu-se que havia uma região do espaço-tempo nessa métrica que apresentava um ponto singular e que até a luz ficaria confinada. Posteriormente essa região foi denominada de buraco negro. Essa nova descoberta desagradou Einstein, que não acreditava em singularidades (ISAACSON, 2007).

Em 1935, Einstein e Rosen escreveram o famoso artigo sobre as pontes de Einstein-Rosen, os famigerados *buracos de minhoca* (*wormholes*). Em nenhum momento durante o artigo, Einstein e Rosen propõem viagens pelos espaço-tempo, mas propõe um método para remover as singularidades da métrica de Schwarzschild-Droste e Reissner-Nordström, e que as “pontes” corresponderiam, para cada métrica, respectivamente, a partículas sem carga e com carga elétrica, como pode ser visto em Einstein, Rosen (1935, p. 73-77).

Em 1936, Einstein e Rosen objetaram a existência de ondas gravitacionais, pois elas implicariam em pontos singulares no espaço-tempo (EINSTEIN, ROSEN, 1935). Mas graças a observações de Robertson e Infeld, Einstein reconheceu que poderiam existir ondas gravitacionais sem implicar em pontos singulares (EINSTEIN, ROSEN, 1935). Em 1939, Einstein escreveu um artigo tentando mostrar que tais singularidades não existiam (EINSTEIN, 1939, p. 922-936).

Enquanto Einstein era vivo, havia apenas duas soluções exatas para a equação de campo: Schwarzschild-Droste e Reissner-Nordström, esta última sendo uma solução para as mesmas condições estudadas por Schwarzschild-Droste, mas considerando que o corpo esférico está carregado (MOURÃO, 1979). Havia uma solução aproximada para corpos com momento angular e sem carga elétrica, a solução de Lense-Thirring (MOURÃO, 1979). Foi somente em 1963 que o físico neozelandês, Roy P. Kerr, obteve a solução exata para um corpo esférico em rotação. A partir dessa solução, foi possível estudar o caso mais geral, um buraco negro com rotação e carga elétrica, a métrica de Kerr-Neumann (MOURÃO, 1979; O'NEILL, 1995; WILTSHIRE; VISSER; SCOTT, 2009). Nessa época, Einstein já havia

falecido, e acreditava-se que seus trabalhos de 1935 e 1939 provavam que não existiam singularidades e, portanto, não existiam buracos negros.

A descoberta de Kerr foi importantíssima para o desenvolvimento do programa de buracos negros, pois todos os corpos celestes apresentam um momento angular. Assim as outras soluções, apesar de sua importância, apenas descreviam corpos hipotéticos, sem existência física (MOURÃO, 1979; NICHOLSON, 1983; O'NEILL, 1995; WILTSHIRE; VISSER; SCOTT, 2009). Outro fato importante é que as singularidades das simetrias axiais da solução de Kerr e Kerr-Neumann não são removíveis, como esperava Einstein (O'NEILL, 1995; WILTSHIRE; VISSER; SCOTT, 2009). O interesse por buracos negros atraiu novos cientistas, dos quais destacamos John Wheeler e Roger Penrose, que lideraram o novo programa de pesquisa em buracos negros (MOURÃO, 1979; NICHOLSON, 1983; O'NEILL, 1995; WILTSHIRE; VISSER; SCOTT, 2009).

Por essa análise, podemos concluir que *Einstein não estava certo*, pois se ele estivesse certo não existiriam singularidades e nem buracos negros. Einstein não participou do programa de buracos negros e se opunha a ele. Embora buracos negros sejam uma consequência lógica da Teoria da Relatividade Geral, atribuir esse mérito a Einstein faz tanto sentido como atribuir a Relatividade Geral a Luigi Bianchi, pois o tensor de Einstein é uma consequência lógica de suas identidades. Curiosamente, entre todas as matérias citadas sobre a imagem do buraco negro M-27, nenhuma menciona as contribuições de Roy Kerr, John Wheeler e Roger Penrose, que lideraram o programa de buracos negros. Mesmo Katie Bouman, que concebeu o algoritmo que permitiu a geração da imagem, sequer é citada em qualquer das matérias mencionadas.

## **XII. Einstein concebeu o germe da Teoria da Relatividade Restrita na adolescência?**

Conta-se que um jovem rapaz chamado Albert Einstein teria formulado as ideias fundamentais da Teoria da Relatividade Restrita em um devaneio juvenil:

*Após dez anos de estudo, o princípio surgiu, resultando de um paradoxo com o qual me defrontara quando tinha dezesseis anos: se um raio luminoso for perseguido a uma velocidade  $c$  (velocidade da luz no vácuo), observamos esse raio de luz como um campo eletromagnético em repouso, embora com oscilação espacial. Entretanto, aparentemente não existe tal coisa, quer com base no experimento, quer de acordo com as equações de Maxwell. Desde o início, tive a intuição clara de que, segundo o ponto de vista desse observador, tudo devia acontecer de acordo com as mesmas leis aplicáveis a um observador que estivesse em repouso em relação à Terra. Pois, como poderia o primeiro observador saber ou determinar que está em estado de movimento rápido uniforme? Vemos nesse paradoxo o germe da teoria da relatividade restrita (EINSTEIN, 1982).*

Esta passagem é contada pelo próprio Einstein em suas *Notas Autobiográficas*, de 1954, um ano antes de seu falecimento. Por ser uma história contada pelo próprio Einstein, é comum reproduzi-la como parte da história da criação da Teoria da Relatividade Restrita, porém, um pouco de reflexão nos leva a um questionamento bastante importante: até que ponto o relato de um cientista é confiável? Essa é uma das questões abordadas no livro *Introdução à Historiografia da Ciência* de Helge Kragh (2001). Em um estudo rigoroso em fontes primárias, Kragh (2001) mostra como cientistas podem modificar ao longo dos anos histórias sobre suas descobertas científicas ou até mesmo inventar episódios fictícios.

*Esquecimentos em geral, e uma tendência para racionalizar à luz de desenvolvimentos posteriores desempenharão naturalmente um papel significativo em relatos retrospectivos de acontecimentos que ocorreram há muitos anos. Além disso, o cientista pode ter motivos para apresentar as suas ações de modo diferente do sucedido. Em relação a conflitos de prioridade, por exemplo, poderia sobrestimar, consciente ou inconscientemente, a sua própria contribuição, alterar datas ou, de qualquer forma suprimir uma realidade que ele pudesse ter desejado ser diferente. Não é difícil encontrar exemplos de afirmações não fiáveis do tipo mencionado. A ausência de fiabilidade pode ser estabelecida quando as afirmações não podem conciliar-se com outros acontecimentos bem documentados ou quando o mesmo cientista relatou a ocorrência em termos que entram em conflito (KRAGH, 2001, p. 167).*

Portanto, convém perguntar: podemos confiar nesse relato de Albert Einstein? A resposta é um sonoro não! Uma análise feita pelos historiadores Holton (1967-1968) e Roberto de Andrade Martins (2015, p. 171-172) revelam que Einstein não estava familiarizado com a teoria eletromagnética naquela época.

*Em primeiro lugar, sabemos com segurança que ele não conhecia a teoria eletromagnética de Maxwell nessa época - ele só a estudou dois anos mais tarde. Então, ele não poderia saber se a teoria de Maxwell prevê ou não ondas eletromagnéticas paradas. Em segundo lugar, a teoria de Maxwell (sem as modificações introduzidas por Lorentz) permitia de fato a ocorrência de ondas eletromagnéticas paradas, se um observador se movesse em relação ao éter com velocidade igual a  $c$ . Em terceiro lugar, se pensarmos em um feixe de luz se propagando no vidro ou em outro material transparente, com uma velocidade igual a  $c/n$  (onde  $n$  é o índice de refração do material), então mesmo de acordo com a teoria da relatividade, um observador pode-se mover a essa mesma velocidade  $c/n$  paralelamente ao material transparente e observar ondas eletromagnéticas paradas. Em quarto lugar, podemos fazer uma comparação simples entre ondas eletromagnéticas e ondas sonoras. Se um observador se mover no ar, a uma velocidade igual à do som (o que era difícil de imaginar no final do século XIX, mas que pode ser facilmente feito hoje em dia), então as ondas sonoras que caminham paralelamente a esse observador, no mesmo sentido, seriam ondas paradas. Não há nada de absurdo nisso. Portanto, o “paradoxo” de Albert não passava de uma ideia*

*confusa, de uma pessoa que não entendia muito sobre teoria eletromagnética. Certamente essa especulação não continha “o germe da relatividade”.*

Seguindo as evidências apontadas por Martins (2015) e por Kragh (2001) podemos concluir que o relato de Einstein deve ser uma invenção ou a racionalização de um experimento irrelevante para garantir a prioridade na criação da relatividade. Na conferência de 1922, *How I Created the Theory of Relativity*, Einstein não faz qualquer menção a esse episódio. Se realmente a história tivesse sido decisiva, como ele afirmou em 1954, esperaríamos que ele tivesse citado nessa palestra, mas ele não o fez.

Em síntese, não há qualquer documento que confirme a declaração de Einstein que aos 16 anos ele teve um *insight* revolucionário que continha o “germe da relatividade”. E mesmo que a história seja verdadeira, a teoria eletromagnética e a própria teoria da relatividade invalidam a afirmação que esse experimento levava a um paradoxo.

### **XIII. Einstein é o pai das Teorias da Relatividade Restrita e Geral?**

Acreditamos que neste ponto esteja claro que Einstein, apesar de suas grandes contribuições para a Física, não pode ser considerado o pai da Teoria da Relatividade Restrita ou Geral. Como mostramos, essas teorias foram sendo gradativamente construídas e envolveram diversas etapas e diversos pesquisadores. Vemos que Einstein participou da edificação das Teorias da Relatividade. Porém muitos resultados haviam sido antecipados e desenvolvimentos posteriores foram apresentados por outros pesquisadores. Na Teoria da Relatividade Especial muitos resultados foram antecipados por Max Abraham, Alfred Bucherer, Paul Langevin, Joseph Larmor, Hendrik Lorentz e Henri Poincaré (WHITTAKER, 1953; KESWANI, 1965a, 1965b, 1966; MARTINS, 1989, 2005, 2015; KATZIR, 2005; WALTER, 2007), enquanto desenvolvimentos posteriores como a construção da métrica de Minkowski, a relação entalpia-energia, a relatividade para corpos extensos e meios contínuos foi realizada por outros pesquisadores como Max Planck, Max Von Laue, Hermann Minkowski, Arnold Sommerfeld etc. (WHITTAKER, 1953; MARTINS, 1989, 2015; WALTER, 2007).

Já na Teoria da Relatividade Geral, podemos citar as contribuições de Gustav Mie, Gunnar Nordström, Hendrick Lorentz, Max Abraham, Marcel Grossmann e David Hilbert (WHITTAKER, 1953; KESWANI, 1966; MEHRA, 1974; EARMAN; GLYMOUR, 1978a, 1978b; MARTINS, 2015). Cronologicamente, Hilbert obteve e publicou as equações de campo antes de Einstein, sem contar que o tratamento de Hilbert era mais completo que o de Einstein, já que ele incluía contribuições do campo eletromagnético no tensor Momento-Energia-Tensão e permitia derivar as equações de Maxwell-Lorentz usando o princípio variacional. Após Einstein, ocorreram novas contribuições e novos programas inspirados na Relatividade Geral, muitos dos quais Einstein não participou e até objetou, como foi o caso do programa de buracos negros (ISAACSON, 2007).

Não negamos a importância de Einstein, mas devemos reconhecer que nem ele, nem qualquer outro pesquisador, como Lorentz, Poincaré ou Hilbert, são pais da Teoria da Relatividade Especial ou Geral. Além da comparação entre o desenvolvimento da ciência e a construção de uma catedral, outra metáfora adequada, introduzida por Rubem Alves (1993), e que torna bastante claro o papel coletivo da ciência, seria compará-la a uma orquestra. O melhor violinista sozinho, na melhor das hipóteses, apresentará um solo de violino, mas nunca uma orquestra. Além disso, esse violinista dentro de uma orquestra não poderá negar seu contexto. Se o seu tempo for diferente de seus colegas, a orquestra perde o compasso e a harmonia se perde e temos apenas o ruído. Em uma orquestra cada instrumento tem que estar sincronizado com os demais e seguir a regência do maestro.

O surgimento da teoria da relatividade especial se deu por uma soma de elementos: o surgimento do relógio mecânico, a revolução industrial e o capitalismo moderno exigiram que o tempo fosse controlado rigorosamente (GALISON, 2003; THOMPSON, 2016). Essa necessidade social implicou em reflexões filosóficas sobre a natureza e a medida do tempo. Foi ponderando sobre métodos de sincronização de relógios que Henri Poincaré (1898, 1900, 1904) e Albert Einstein (1905) desenvolveram um dos conceitos fundamentais da Relatividade: a quebra da simultaneidade. Mas essas reflexões exigiam experimentos delicados envolvendo a transmissão de sinais luminosos e ondas eletromagnéticas. Esses experimentos só se tornaram possíveis após a aceitação da teoria eletromagnética de Maxwell, o surgimento do telégrafo sem fio e os experimentos interferométricos (GALISON, 2003). Mesmo que concordemos com Holton que o experimento de Michelson-Morley não teve influência direta sobre Einstein, não podemos negar que muitos dos autores que Einstein estudou, como Lorentz e Poincaré, basearam suas análises nesses experimentos. Sem essas pesquisas, sem os trabalhos em eletromagnetismo que dominaram o interesse dos físicos europeus, sem as necessidades sociais e políticas sobre a natureza do tempo e o uso de telégrafos e redes de relógios, não haveria um contexto apropriado para o surgimento da relatividade especial.

O desenvolvimento da Teoria da Relatividade Geral não foi exceção. A percepção de Poincaré (1905-1906) de que as transformadas de Lorentz são rotações que mantém a forma quadrática espaço-tempo invariante inspirou Minkowski (1907) a propor o conceito de espaço-tempo quadridimensional e a buscar uma formulação tensorial do eletromagnetismo. Sommerfeld aderiu ao novo formalismo, mas enquanto Minkowski usava o formalismo dos 4-vetores e tensores de segunda ordem, Sommerfeld preferiu utilizar um sistema que utiliza 4-vetores e 6-vetores<sup>24</sup> (WALTER, 2007). Max Von Laue desenvolveu o tensor momento-

---

<sup>24</sup> 4-Vetor e 6-Vetor são vetores com 4 e 6 dimensões respectivamente. O 6-Vetor é estruturalmente equivalente aos tensores antissimétricos de segunda ordem, no espaço-tempo 4-dimensional. Com a criação do espaço-tempo por Poincaré e Minkowski é fácil atribuir um significado físico a um tensor antissimétrico. Por outro lado, o 6-vetor exige a adição de dimensões extras e que são difíceis de se atribuir um significado físico. Esta é uma das razões para abordagem de Sommerfeld ter degenerado. Para detalhes ver *Da Força ao Tensor* (SILVA, 2002). Esses objetos não devem ser confundidos com os n-vetores das álgebras de Grassmann (Extensão ou Exterior) e de Clifford (Geométrica).

energia para estudar sistemas extensos e meios contínuos. Esse é o mesmo tensor que Einstein adotaria a partir de 1912. Planck mostrou que a inércia associada à energia deveria sofrer ação gravitacional e Eötvös testou o princípio da equivalência até o limite da precisão. (WHITTAKER, 1953).

Abraham e Nordström propuseram modificações no tensor métrico para incluir efeitos gravitacionais. Esse foi o mesmo procedimento adotado por Einstein. Hilbert, inspirado pelas ideias de Minkowski e pela eletrodinâmica de Mie, buscou uma maneira de unificar gravidade e eletromagnetismo. Embora Hilbert não tenha conseguido a unificação, ele conseguiu incluir potenciais eletromagnéticos no tensor de Laue, um passo fundamental na teoria que não foi dado por Einstein. Hermann Weyl conseguiu uma formulação ainda mais abrangente ao introduzir um novo tensor de curvatura (MEHRA, 1974).

Um estudo cientométrico<sup>25</sup> realizado por Walter (2011) mostra que a influência da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein foi muito pequena entre 1905-1910. Houve um pequeno aumento a partir de 1912 em toda Europa e um salto na Alemanha. Esse fato deve-se à tensão entre a Alemanha e o resto da Europa e a eclosão da primeira guerra mundial. A Inglaterra passou a tratar com ressentimento a produção alemã e os alemães começaram a valorizar sua própria produção científica. Todas essas condições, científicas e políticas, deram espaço para o surgimento da Teoria da Relatividade Geral. (MEHRA, 1974).

É preciso abrir os ouvidos para ouvir a orquestra e compreender a sua harmonia, e é esse o objetivo que buscamos com esse artigo. Esperamos com esse trabalho ter levado, de alguma forma, o leitor a refletir sobre as pseudo-histórias que giram em torno da Relatividade e de Einstein e despertar uma consciência crítica e questionadora sobre o que se diz a respeito da história e a natureza da ciência. Esperamos ter mostrado que a visão positivista de ciência deve ser questionada e que devemos ver a ciência em toda a sua complexidade, como uma construção coletiva e um fenômeno social e histórico.

#### **XIV. Considerações finais**

Ao longo dessas páginas tentamos desconstruir 12 mitos sobre a Teoria da Relatividade e sobre Albert Einstein. São histórias que aparecem nos livros didáticos, nos livros textos do ensino superior, em mídias de popularização da ciência, jornais e até mesmo na autobiografia de Einstein. Não se trata de uma concepção limitada a grupos específicos, como professores e alunos da educação básica, público leigo ou jornalistas, mas atingem todos os níveis de conhecimento e incluem físicos e astrônomos, que as utilizam frequentemente. Muitas vezes, esses mitos são tomados como verdade, pois são passados por autoridades como professores, físicos renomados (inclusive ganhadores do prêmio Nobel) e

---

<sup>25</sup> Cientometria é um campo da história da ciência que visa quantificar a produção científica, impacto e outras variáveis de produção acadêmica sobre um determinado assunto em um determinado período de tempo. Para detalhes ver Kragh (2001, p. 201-2016).

pelo próprio Einstein em seus escritos. Nesse sentido, concordamos com Rubem Alves (1993, p. 14):

*O cientista virou um mito. E todo mito é perigoso, porque ele induz o comportamento e inibe o pensamento. Este é um dos resultados engraçados (e trágicos) da ciência. Se existe uma classe especializada em pensar de maneira correta (os cientistas), os outros indivíduos são liberados da obrigação de pensar e podem simplesmente fazer o que os cientistas mandam. Quando o médico lhe dá uma receita você faz perguntas? Sabe como os medicamentos funcionam? Será que você se pergunta se o médico sabe como os medicamentos funcionam? Ele manda, a gente compra e toma. Não pensamos. Obedecemos. Não precisamos pensar, porque acreditamos que há indivíduos especializados e competentes em pensar. Pagamos para que ele pense por nós. E depois ainda dizem por aí que vivemos em uma civilização científica... O que eu disse dos médicos você pode aplicar a tudo. Os economistas tomam decisões e temos de obedecer. Os engenheiros e urbanistas dizem como devem ser as nossas cidades, e assim acontece. Dizem que o álcool será a solução para que nossos automóveis continuem a trafegar, e a agricultura se altera para que a palavra dos técnicos se cumpra. Afinal de contas, para que serve a nossa cabeça? Ainda podemos pensar? Adianta pensar?*

Vimos que muitos jornais tentam dar mérito a Einstein até em questões em que ele não teve participação direta, como no caso dos buracos negros. A *hashtag* “Einstein estava certo” reflete justamente a criação desse mito, pois se as previsões de Einstein realmente se confirmassem, buracos negros não existiriam. Por isso, ao tratar de uma figura tão popular como Albert Einstein, algumas pessoas preferem acreditar no mito em vez de no homem.

O eclipse de 1919 trouxe à luz várias reflexões sobre a natureza do espaço-tempo e a consolidação da Teoria da Relatividade Geral levou ao programa de buracos negros que recentemente atingiu um novo patamar com a fotografia realizada pelo grupo de Katie Bouman. Paradoxalmente, esses dois eventos também são importantes na consolidação do mito da Teoria da Relatividade e Albert Einstein. Esse mito tem lançado à sombra diversas verdades e decorridos 100 anos do famoso eclipse já é hora de trazermos alguma luz a essas verdades eclipsadas.

Não é raro que professores usem materiais históricos ou anedotas da ciência para atrair atenção dos alunos e tornar as aulas mais interessantes. O uso da história da ciência e de textos de popularização científica tem um alto potencial de ensino e engajamento dos alunos, mas assim como qualquer remédio, o que o diferencia do veneno é a dose e sua aplicação correta. O uso de pseudo-histórias ou de textos mistificados de popularização da ciência faz com que os alunos absorvam informações erradas que dificilmente serão erradicadas. (MARTINS, 1998).

Por outro lado, os professores reclamam, e com razão, que muito se critica na academia as abordagens históricas feitas com material de divulgação científica em sala de aula, mas a academia oferece poucos recursos aos professores para lidar com estes problemas

(MARTINS, 2009). Esse é um ponto crucial, de fato há poucos materiais históricos adaptados para o contexto do ensino e os textos de divulgação científica de qualidade se perdem em uma enxurrada de material mal produzido, mas amplamente divulgado pela mídia. Por isso, esperamos com esse trabalho, ajudar a preencher essa lacuna de materiais adequados. Parafrazeando Werner Heisenberg, o especialista é aquela pessoa que sabe quais são os erros mais comuns e como evitá-los. Ao elencar 12 mitos sobre a Relatividade, acreditamos que não apenas estamos trazendo material para ser discutido em sala de aula e por divulgadores, como também estamos esclarecendo 12 parâmetros na escolha de outros materiais para se trabalhar em sala de aula.

É preciso abrir os ouvidos para ouvir a orquestra e compreender a sua harmonia, e é esse o objetivo que buscamos com esse artigo. Esperamos com esse trabalho ter levado, de alguma forma, o leitor a refletir sobre as pseudo-histórias que giram em torno da Relatividade e de Einstein e despertar uma consciência crítica e questionadora sobre o que se diz a respeito da história e a natureza da ciência. Esperamos ter mostrado que a visão positivista deve ser rejeitada e devemos ver a ciência em toda a sua complexidade, como uma construção coletiva e um fenômeno social e histórico.

## Referências

ALVES, R. **Filosofia da Ciência: Introdução ao Jogo e suas Regras**. 20. ed. São Paulo: Brasiliense, 1994.

APÓS 100 anos, cientistas comprovam ondas gravitacionais de Einstein. Curiosamente. Pernambuco: 11 de fevereiro de 2016. Project. Disponível em:  
<<http://curiosamente.diariodepernambuco.com.br/project/apos-100-anos-cientistas-comprovam-ondas-gravitacionais-de-einstein/>> Acesso em: 20 jun. 2019.

AUFFRAY, J. P. **O Espaço-Tempo**. Lisboa: Flammarion, 1998.

BAGDONAS, A.; SILVA, C. C. Controvérsias sobre a Natureza da Ciência na Educação Científica. In: SILVA, C. C, PRESTES, M. E. B. (Org). **Aprendendo ciência e sobre sua natureza**: abordagens históricas e filosóficas. São Carlos: Tipographia, 2013. p. 213-223.

BLOCH, M. **Apologia da história**: Ou o ofício do historiador. Rio de Janeiro: Zahar, 2002.

BARRETO FILHO, B.; SILVA, C. X. **Física aula por aula V. 3: Eletromagnetismo, Física Moderna**. 3. Ed. São Paulo: FTD, 2016.

BASS, L.; SCHRÖDINGER, E. Must the Photon Mass be Zero? **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 232, n. 1188, p. 1-6, October 11, 1955.

BBC. Parece que Einstein acertou mais uma vez: análise de imagem inédita de buraco negro levou 2 anos. *Ciência e Saúde*. São Paulo: 10 de Abril de 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2019/04/10/parece-que-einstein-acertou-mais-uma-vez-analise-de-imagem-inedita-de-buraco-negro-levou-2-anos.ghtml>>. Acesso em: 25 jun. 2019.

BISCUOLA, J. G.; BÔAS, N. V.; DOCA, R. H. **Física 3: Eletricidade, Física Moderna**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

BOHM, D. **A Teoria da Relatividade Restrita**. São Paulo: Editora UNESP, 2014.

BONJORNO, J. R. *et al.* **Física 3: Eletromagnetismo, Física Moderna**. 3. Ed. São Paulo: FTD, 2016.

BORN, M. **Einstein's Theory of Relativity**. Oxford: Oxford University, 1922.

BRADING, K. A Note on general relativity, energy conservation, and noether's theorems. In: KOX, A. J. EISENSTAEDT, J. (Eds.). **The Universe of General Relativity** (Einstein Studies, v. 11). Boston: Birkhäuser, 2005. p. 125-136.

BROWN, K. **Reflections on Relativity**. Morrisville: Lulu Press, 2017.

BRUSH, S. G. Why was Relativity Accepted? **Physics in Perspective**, v. 1, n. 2, p 184-214, Jun. 1999.

CERVANTES-COTA, J. L.; URIBARRI, S. G.; SMOOT, G. F. A Brief History of Gravitational Waves. **Universe**, v. 2, n. 3, p. 22-52, 2016.

CHALMERS, A. F. **O que é Ciência, afinal?** São Paulo: Brasiliense, 1993.

CHALMERS, A. F. **A Fabricação da Ciência**. São Paulo: Editora UNESP, 1994.

COLLINS, H. **Gravity's shadow: the search for gravitational waves**. Chicago: The University of Chicago Press, 2004.

DAVIS, W. R. My science data book says that the mass of a photon is zero. But how can photon exert radiation pressure, as it occurs in the sun? Physlink, sem data. Disponível em: <<https://www.physlink.com/education/askexperts/ae180.cfm>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

DIEGUEZ, F. E se Einstein não tivesse existido? **Superinteressante**, São Paulo, 13 de março de 2017. Disponível em: <<https://super.abril.com.br/historia/e-se-einstein-nao-tivesse-existido/>> Acesso em: 13 jun. 2019.

DIEKE, S. H.; SCHWARZCHILD, K. In: GILLESPIE, C. C. (Ed.). **Dictionary of Scientific Biography**. New York: Scribner's, 1975. v. 12, p. 247-253.

DOMÍNGUES, N. Ciência confirma a teoria das ondas gravitacionais de Albert Einstein. El País. Madrid: 12 de fevereiro de 2016. Ciência. Disponível em: <[https://brasil.elpais.com/brasil/2016/02/11/ciencia/1455201194\\_750459.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2016/02/11/ciencia/1455201194_750459.html)>. Acesso em: 20 jun. 2019.

EARMAN, J.; GLYMOUR, C. Relativity and eclipses: the british eclipse expeditions of 1919 and their predecessors. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v. 11, n. 1, p. 49-85, 1980.

EDDINGTON, A. S. The propagation of gravitational waves. **Proceedings of the Royal Society of London A**, v. 102, issue 716, p. 268-282, December 1, 1922.

EDWARDS, M. R. (Ed.). **Pushing Gravity**: new perspectives on Le Sage's Theory of Gravitation. Montreal: Apeiron, 2002.

EINSTEIN, A. Zur Elektrodynamik bewegter Körper. **Annalen der Physik**, 1905a, n. 17, p. 891-921.

EINSTEIN, A. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? **Annalen der Physik**, v. 18, n. 13, p. 639-641, 1905b.

EINSTEIN, A. Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. **Annalen der Physik**, n. 49, p. 769-822, 1916a.

EINSTEIN, A. Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation. Preussischen Akademie der Wissenschaften Berlin, 1916b.

EINSTEIN, A. **Äther und Relativitätstheorie**. Berlin: Verlag von J. Springer, 1920.

EINSTEIN, A. Ether and the Theory of Relativity (Lecture gave an address on 5 May 1920 at the University of Leiden). London: Methuen, 1922.

EINSTEIN, A. Über den Äther, Vierteljahresschrift der naturforschenden Gesellschaft, Zürich, 105, p. 85-93, 1924.

EINSTEIN, A. Raum, Äther und Feld in der Physik, **Forum Philosophicum**, v. 1, p. 173-180, 1930.

EINSTEIN, A. On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses. **Annals of Mathematics**, second series, v. 40, n. 4, p. 922-936, October 1939.

EINSTEIN, A. **Notas autobiográficas**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1982.

EINSTEIN, A. How I created the theory of relativity. **Physics Today**, v. 35, p. 45-47, August 1982<sup>26</sup>.

EINSTEIN, A. ROSEN, N. The particle problem in General Theory of Relativity. **Physical Review**, n. 48, p. 73-77, 1935.

EINSTEIN E EDDINGTON. Direção: Philip Martin. Roteiro: Peter Moffat. [S.l.]: Company Pictures e a BBC, 2008. 1 DVD (89 min), NTSC, color. Título original: Einstein and Eddington.

EISBERG, R.; RESNICK, R. **Física Quântica**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1979.

FAYNGOLD, M. **Special Relativity and motions faster than light**. Newark: New Jersey Institute of Technology, 2002.

FARAONI, V. **Special Relativity**. New York: Springer, 2013.

FEYERABEND, P. K. Zahar on Einstein. **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 25, n. 1, p. 25-28, Mar. 1974.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de Física de Feynman - A Edição Definitiva**. Porto Alegre: Bookman, 2008. 4 v.

---

<sup>26</sup> Transcrição da palestra proferida em 14 de dezembro de 1922, na Universidade de Kyoto.

FIMOW. **Einstein e Eddington**. Disponível em: < <https://filmow.com/einstein-e-eddington-t12568/>>. Acesso em: 25 mai. 2019.

FOX, R.; KUPER, C. G.; LIPSON, S. G. Faster-than-light group velocities and causality violation. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, v. 316, n. 1527, p. 515-524, May 1970.

FRENCH, A. P. **Special Relativity**. New York: Norton, 1968.

GALISON, P. **Einstein's Clock and Poincaré's maps: empire of time**. New York: Norton, 2003.

GASPAR, A. **Compreendendo a Física: Eletromagnetismo e Física Moderna**. 3. Ed. São Paulo: Ática, 2017.

GIL-PÉREZ, D. *et al.* Para uma imagem não deformada do trabalho científico. **Ciência & Educação**, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.

GLEISER, M. **A dança do universo: dos mitos de criação ao Big-Bang**. 2. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

GOLDHABER, A. S.; NIETO, M. M. Photon and graviton mass limits. **Reviews of Modern Physics**, v. 82, p. 939-979, 2010.

GRIFFITHS J. B.; PODOLSKY, J. **Exact space-times in Einstein's General Relativity**. Cambridge: Cambridge Press, 2009.

GUIMARÃES, O.; PIQUIERA, J. R.; CARRON, W. **Física: Eletromagnetismo e Física Moderna**. 3. Ed. São Paulo: Saraiva, 2016.

HARTOG, F. 2015. **Regimes de Historicidade: presentianismo e experiência do tempo**. Belo Horizonte: Autêntica.

HAWKING, S. **Os Gênios da Ciência: sobre os ombros de gigantes**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

HEBERT, N. **Faster than light: Superluminal Loopholes in Physics**. New York: New American Library, 1989.

HOLTON, G. Influences on Einstein's Early Work in Relativity Theory. **The American Scholar**, v. 37, n. 1, p. 59-79, 1967-1968.

HOLTON, G. Einstein, Michelson, and the "Crucial" Experiment. **Isis**, v. 60, n. 2, p. 132-197, 1969.

HOLTON, G. **Thematic origins of scientific thought: Kepler to Einstein**. Cambridge: Harvard University Press, 1973.

HOLTON, G. On the Role of Themata in Scientific Thought. **Science**, New Series, v. 188, n. 4186, p. 328-334, Apr. 1975.

HORVATH, J. *et al.* **Cosmologia Física do Micro ao Macro Cosmos e Vice-Versa**. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2011.

IF photons have zero mass, why do they feel the effects of gravity? (Advanced). Ask an Astronomer. New York, February 1, 2019. The Theory of Relativity. Disponível em: <<http://curious.astro.cornell.edu/about-us/140-physics/the-theory-of-relativity/general-relativity/1021-if-photons-have-zero-mass-why-do-they-feel-the-effects-of-gravity-advanced>> Acesso em: 18 jun. 2019.

IMAGEM de buraco negro prova (mais uma vez) que Einstein estava certo. Instituto Humanitas Uníssonos. Rio Grande do Sul: 11 de Abril de 2019. Disponível em: <<http://www.ihu.unisinos.br/78-noticias/588334-imagem-de-buraco-negro-prova-mais-uma-vez-que-einstein-estava-certo>> Acesso em: 25 jun. 2019.

ISAACSON, W. **Einstein: sua vida, seu universo**. São Paulo: Companhia das Letras, 2007.

JOHANSEN, N. V.; RAVNDAL, F. On the discovery of Birkhoff's theorem. **General Relativity and Gravitation**, v. 38, n. 3, p. 537-540, March 2006.

KATZIR, S. Poincaré's relativistic theory of gravitation. In: KOX, A. J.; EISENSTAEDT, J. (Eds.). **The Universe of General Relativity** (Einstein Studies, v. 11). Boston: Birkhäuser, 2005. p. 15-38.

KENNEFICK, D. **Traveling at the speed of thought: Einstein and the quest for gravitational waves**. Princeton: Princeton University Press, 2007.

KESWANI, G. H. Origin and Concept of Relativity (I). **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 15, p.286-306, 1965a.

KESWANI, G. H. Origin and concept of Relativity (II). **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 16, p.19-32, 1965b.

KESWANI, G. H. Origin and Concept of Relativity (III). **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 16, p.19-32, 1966.

KRAGH, H. **Introdução à historiografia da ciência**. Porto: Porto Editora, 2001.

KREISLER, M. N. Are there faster-than-light particles? A review of the hypotheses about the nature of tachyons and of experimental searches for them. **American Scientist**, v. 61, n. 2, p. 201-208, March-April 1973.

LANDAU, L.; LIFSHITZ, E. **Teoria do Campo**. São Paulo: Hemus, 1980.

LANGEVIN, P. L'inertie de l'énergie et ses conséquences. **Journal de Physique Théorique et Appliquée**, v. 3, n. 1, p. 553-591, 1913.

MARTÍN, B. Imagem de buraco negro prova (mais uma vez) que Einstein estava certo. El País. Madrid: 11 de Abril de 2019. Ciência. Disponível em:  
<[https://brasil.elpais.com/brasil/2019/04/10/ciencia/1554891419\\_402732.html](https://brasil.elpais.com/brasil/2019/04/10/ciencia/1554891419_402732.html)> Acesso em: 25 jun. 2019.

MARTINS, R. de A. O princípio de antecedência das causas na teoria da relatividade. Anais da ANPOF 1, v. 1, p. 51-72, 1986.

MARTINS, R. de A. A relação massa-energia e energia potencial. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 6, n. especial, p. 56-80, jun. 1989.

MARTINS, R. de A. Como distorcer a física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica. 2 - Física moderna. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 15, n. 3, p. 265-300, dez. 1998.

MARTINS, R. de A. The search for gravitational absorption in the early 20th century. In: GOEMMER, H.; RENN, J.; RITTER, J. (Eds.). **The expanding worlds of general relativity (Einstein Studies, vol. 7)**. Boston: Birkhäuser, 1999. p. 3-44.

MARTINS, R. de A. A dinâmica relativística antes de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, p. 11-26, 2005a.

MARTINS, R. A. El empirismo en la relatividad especial de Einstein y la supuesta superación de la teoría de Lorentz y Poncaré. In: FAAS, H.; SAAL, A.; VELASCO, M. (Eds.). **Epistemología e Historia de la Ciencia. Selección de Trabajos de las XV Jornadas. Facultad de Filosofía y Humanidades**. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba, 2005b.

MARTINS, R. de A. A História das Ciências e Seus Usos na Educação. In: SILVA, C. C. (Ed.). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Livraria da Física, 2006. p. XVII-XXX.

MARTINS, R. de A. **Teoria da Relatividade Especial**. São Paulo: Livraria da Física, 2012.

MARTINS, R. de A. A fundamentação histórica da lei da inércia: um exemplo de conflito entre educadores e historiadores da ciência no uso da história da ciência no ensino de física. In: CAMARGO, S. *et al.* (Orgs.). **Controvérsias na pesquisa em ensino de física**. São Paulo: Livraria da Física, 2014. p. 143-159.

MARTINS, R. de A. **A Origem Histórica da Relatividade Especial**. São Paulo: Livraria da Física, 2015.

MARTINI, G. *et al.* **Conexões com a Física 3: Eletricidade, Física do século XXI**. 3. ed. São Paulo: Moderna, 2016.

MCCOMAS, W. F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M. P. The Nature of Science in Science Education: an introduction. **Science and Education**, v. 7, p. 511-532, 1998.

MCCOMAS, W. F. **The Language of Science Education: an expanded glossary of key terms and concepts in science teaching and learning**. Sense Publishers: Rotterdam, 2014.

MEHRA, J. **Einstein, Hilbert, and the Theory of Gravitation**. Dordrecht: D. Reidel, 1974.

MOURÃO, R. R. F. **Buracos Negros: Universos em Colapso**. Petrópolis: Vozes, 1979.

NARLIKAR, J. V. Cosmic Tachyons: an astrophysical approach. The interaction of tachyons—faster-than-light particles—with gravity leads to results of interest to cosmology and black hole physics. **American Scientist**, v. 66, n. 5, p. 587-593, September-October 1978.

NEWTON, R. G. Particles that travel faster than light? **Science**, New Series, v. 167, n. 3925, p. 1569-1574, March 1970.

NICOLSON, I. **Gravidade, Buracos Negros e o Universo**. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1983.

NOVELLO, M. **O que é cosmologia?** Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 2006.

ONDA Gravitacional. In: WIKIPÉDIA: a enciclopédia livre. Wikimedia, 2019. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Onda\\_gravitacional](https://pt.wikipedia.org/wiki/Onda_gravitacional)>. Acesso em: 20 jun. 2019.

O'NEILL, B. **The Geometry of Kerr Black Holes**. New York: Dover Books, 1995.

OLIVEIRA, A. J. A história do eclipse de Sobral (CE) que comprovou a Teoria da Relatividade. **Revista Galileu**. São Paulo: 10 de Outubro de 2018. Disponível em: <<https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/10/historia-do-eclipse-de-sobral-ce-que-comprovou-teoria-da-relatividade.html>> Acesso em: 18 jun. 2019.

OSTERMANN, R.; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 21, n. 1, p. 83-102, abril de 2004.

PAULI, W. **Theory of Relativity**. New York: Dover Books, 1958.

PEREIRA, C. Einstein estava certo. Isto é. São Paulo: 12 de Abril de 2019. Disponível em: <<https://istoe.com.br/einstein-estava-certo/>> Acesso em: 25 jun. 2019.

PIMBBLET, K. Primeira imagem de um buraco negro confirma a Teoria da Relatividade de Einstein. Portal do Astrônomo. São Domingos de Rana: 11 de abril de 2019. Disponível em: <<https://portaldoastronomo.org/2019/04/primeira-imagem-de-um-buraco-negro-confirma-a-teoria-da-relatividade-de-einstein/>> Acesso em: 25 jun. 2019.

PINSKY, C. B. (Org.). **Fontes Históricas**. São Paulo: Contexto, 2006.

PINSKY, C. B.; LUCA, T. R. de. (Orgs.). **O Historiador e suas fontes**. São Paulo: Contexto, 2011.

POINCARÉ, H. La mesure du temps. **Revue de Métaphysique et de Morale**, tome 6, n. 1, p. 1-13, Janvier 1898.

POINCARÉ, H. La théorie de Lorentz et le principe de réaction. **Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles**, n. 5, p. 252-278, 1900.

POINCARÉ, H. L'état et l'avenir de la Physique mathématique. **Bulletin des Sciences Mathématiques**, v. 28, p. 302-324, 1904.

POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, t. 140, p. 1504-1508, 5 juin 1905.

POINCARÉ, H. Sur la dynamique de l'électron. **Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo**, v. 21, p. 129-176, 1906.

PROST, A. **Doze lições sobre a História**. Belo Horizonte: Autêntica, 2008.

RECAMI, E. Classical Tachyons and possible applications. **Rivista del Nuovo Cimento**, v. 9, n. 6, p. 1-178, May 1986.

REDAÇÃO. Descoberta histórica da ciência confirma o que Einstein constatou há muitos anos. Canaltech. São Bernardo do Campo. 11 de Fevereiro de 2016. Ciência. Disponível em: <<https://canaltech.com.br/ciencia/cientistas-confirmam-existencia-das-ondas-gravitacionais-de-einstein-57777/>> Acesso em: 20 jun. 2019.

RESNICK, R. **Introduction to Special Relativity**. New York: John Wiley, 1968.

REUTERS. Cientistas detectam pela terceira vez ondas gravitacionais previstas por Einstein. G1 Globo. São Paulo: 02 de Fevereiro de 2017. Ciência e Saúde Disponível em: <<https://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/cientistas-detectam-pela-terceira-vez-ondas-gravitacionais-previstas-por-einstein.ghtml>> Acesso em: 20 jun. 2019.

SCHLINDWEIN, M. Qual é o Peso da Luz? **Superinteressante**. São Paulo: 4 de Julho de 2018. Disponível em: < <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/qual-e-o-peso-da-luz/>>. Acesso em: 18 jun. 2019.

SILVA, C. C. **Da Força ao Tensor**: evolução do conceito físico e da representação matemática do campo eletromagnético. 2002. Tese (Doutorado) - São Paulo, Instituto de Física Gleb Wataghin, UNICAMP.

THOMPSON, E. P. **Costumes em Comum**. São Paulo: Companhia Das Letras, 2016.

THOMSEN, D. E. Particles without mass: the enigma of the photon. **Science News**, v. 100, n. 3, p. 46-47, Jul. 1971.

TORRES, C. M. A. *et al.* **Física, Ciência e Tecnologia 3**: Eletromagnetismo, Física Moderna. 4. ed. São Paulo: Moderna, 2016.

VELTEN, H. E. S. Mond: uma alternativa à mecânica newtoniana. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 3, p. 3314, São Paulo, July/Sept. 2008.

WALTER, S. Breaking in the 4-Vectors: The four-dimensional movement in gravitation. 1905-1910. In: RENN, J. (Ed.). **The Genesis of General Relativity**. Berlin: Springer, 2007. v. 3. p. 193-252.

WALTER, S. Henri Poincaré, theoretical physics, and relativity theory in Paris. In: SCHLOTE, K-H., SCHNEIDER, M. (Eds.). **Mathematics Meets Physics**: A contribution to their interaction in the 19th and the first half of the 20th century. Frankfurt: Verlag Harri Deutsch, 2011. p. 213-239.

WEINBERG, S. **Gravitation and cosmology: principles and applications of the general theory of relativity**. Hoboken: Willey, 1972.

WHITTAKER, E. T. **A history of the theories of aether and electricity**. The Modern Theories. New York: American Institute of Physics, 1953. v. 2.

WILTSHIRE, D. L.; VISSER, M.; SCOTT, S. M. **The Kerr space-time**: rotating black holes in general relativity. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. **Física para o Ensino Médio 3**: Eletricidade, Física Moderna. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma Licença Creative Commons.