

Nas entrelinhas dos equipamentos: tradução e análise do trabalho de Michelson e Morley⁺*

Thiago Calixto da Silva¹

Licenciando em Física – Universidade Estadual da Paraíba

Ana Paula Bispo da Silva¹

Universidade Estadual da Paraíba

Campina Grande – PB

Resumo

A inserção de fontes primárias no Ensino de Física tem sido tratada como potencialmente importante tanto para a compreensão de aspectos conceituais, quanto sobre o conhecimento científico. Neste trabalho trazemos a tradução e análise de uma fonte primária que tem como principal destaque a descrição de um experimento e seus resultados. Nesse sentido, a ênfase está nos aspectos procedimentais e no arcabouço teórico que permeiam a execução do experimento de Michelson e Morley em 1887. Pretendemos que a tradução dessa fonte primária possa trazer subsídios para se discutir aspectos conceituais quanto à natureza da luz e interferometria; procedimentais, quanto aos critérios adotados pelos estudiosos na melhoria da precisão do experimento; e também contextuais, ao evidenciar a prática científica experimental e seu papel na elaboração e aceitação de hipóteses. Entendemos, portanto, que essa fonte primária traduzida, quando associada a uma proposta investigativa, se constitui importante contribuição para a inserção da história da física no Ensino de Física.

Palavras-chave: Michelson e Morley; Interferometria; Fontes Primárias; Ensino de Física.

⁺ Between the lines of equipment: translation and analysis of Michelson and Morley's paper

^{*} Recebido: 5 de novembro de 2025

Aceito: 20 de março de 2026.

¹ E-mails: silva.anapaulabispo@gmail.com; thiagocalixt@gmail.com

Abstract

The inclusion of primary sources in Physics Teaching has been considered potentially important for understanding both conceptual aspects and scientific knowledge. In this paper, we present the translation and analysis of a primary source that has as its main focus the description of an experiment and its results. In this sense, the emphasis is on the procedural aspects and the theoretical framework that permeate the execution of the Michelson and Morley experiment in 1897. We intend that the translation of this primary source can provide support for discussing conceptual aspects regarding the nature of light and interferometry; procedural aspects, regarding the criteria adopted by scholars to improve the accuracy of the experiment; and contextual aspects, by highlighting the experimental scientific practice and its role in the elaboration and acceptance of hypotheses. We understand, therefore, that this primary source translated, when associated with an investigative proposal, constitutes an important contribution to the inclusion of the history of physics in Physics Teaching.

Keywords: *Michelson and Morley; Interferometry; Primary Sources; Physics Teaching.*

I. Introdução

Em história da ciência, adotamos como fontes primárias materiais relativos ao período em estudo, sejam textos acadêmicos ou não. São fontes primárias: artigos, cartas, anais ou atas de reuniões, discursos de Nobel, imagens, charges, fotografias, objetos, etc., que permitem compreender a produção científica em seu contexto, sob diferentes perspectivas (Martins, 2005; Pinsky, 2019). A literatura em Ensino de Física tem apontado diferentes possibilidades e potencialidades para a utilização de fontes primárias em sala de aula, seja na educação básica ou na formação de professores. O estudo de originais pode servir para se conhecer aspectos conceituais explorados de uma forma mais contextualizada (Karam, 2021; Rabeno; Lima, 2023); ou identificar elementos que tratem da natureza da ciência (Cordeiro, 2021). No estudo de casos históricos, as fontes primárias podem revelar elementos que ajudam a compreender pressupostos e influências na obtenção de teorias ou conclusões, como: o idioma de publicação, o qual indica o público que o estudioso queria atingir; a linguagem técnica específica, que sugere uma expertise do autor; os outros nomes que são mencionados pelo personagem principal em troca de cartas e citações (Moura, 2019; Bezerra; Moura, 2024). Portanto, entendemos que a tradução de fontes primárias pode auxiliar na implementação de abordagens

baseadas na história da ciência e trazer contribuições para um ensino crítico e contextualizado (Pinto, 2022).

No presente trabalho o que nos levou a realizar a tradução da fonte foi a prática experimental. Os relatos de execução de experimentos evidenciam pressupostos teóricos e assumem habilidades tácitas que não costumam ser declaradas. É o caso do kit didático do experimento de Michelson-Morley (Campos *et. al.*, 2008, p. 181), que trouxe questionamentos em relação à versão histórica da fonte primária (Michelson; Morley, 1887), e às versões presentes em referências consultadas como Martins (2012; 2023). Tanto o procedimento de medida, o objetivo do experimento (determinar o comprimento de onda da fonte de luz), quanto as partes que compõem o kit eram distintos do relato da fonte primária. A versão de simulação computacional possuía diferenças do kit didático, mas também não era fidedigna ao relato da fonte primária. Tanto uma versão quanto a outra desconsideravam fatores fundamentais na compreensão do fenômeno de interferência e seu emprego como forma de determinar o movimento relativo da Terra², qual seria a influência do éter, a precisão do equipamento, e o tipo de fonte de luz utilizada.

A tradução da fonte primária trouxe informações relevantes para esclarecer as habilidades necessárias na utilização dos kits, na compreensão do fenômeno de interferência e na finalidade do experimento no século XIX e atualmente. Além disso, ao estudar a fonte primária sobre o experimento, juntamente com a manipulação do kit, observamos aspectos sobre o fazer científico, como as habilidades tácitas e o contexto de execução do experimento; as teorias que conduziram a produção e a análise dos resultados pelos cientistas; e como as interpretações dos resultados se modificam em outros espaços e tempos (Silveira; Peduzzi, 2006; Fleck, 1986; Cordeiro, 2021). Portanto, consideramos que o estudo da fonte primária sobre o experimento pode ser um aliado para uma discussão investigativa e epistemologicamente relevante para propostas experimentais, principalmente no caso de física moderna e contemporânea, em que conceitos e interpretações estão distantes da manipulação direta pelos estudantes. Nesse sentido, no presente artigo trazemos um pouco sobre as biografias de Michelson e Morley, o contexto e as ideias vigentes que influenciaram os estudiosos e conduziram seus olhares na leitura dos resultados³ e a tradução, com comentários, do artigo que descreve o experimento (Michelson; Morley, 1887).

II. Contextualização dos personagens e experimentos

Albert Abraham Michelson (1852-1931) nasceu em 19 de dezembro de 1852 em Strelno, Alemanha ou, nos dias atuais, em Strezelno, Polônia. Quando tinha dois anos de idade,

² A discussão dos kits e simulações didáticas e suas distorções será feita em outro trabalho.

³ Há vários trabalhos na literatura sobre os experimentos com interferômetros no século XIX, o papel do éter, etc. (Pimentel Jr., 2012; Martins, 2012, Martins, 2023). Assim, traremos apenas alguns tópicos mais relevantes para a discussão da prática experimental.

sua família se mudou para a Califórnia, lugar em que concluiu a educação básica e em 1869 entrou para a Academia Naval dos Estados Unidos em Annapolis, na qual se graduou em 1873 e entre 1875-79 foi instrutor de química e física (Shankland, 1953). Foi em 1877 que Michelson fez sua primeira medida da velocidade da luz utilizando métodos similares aos de Léon Foucault⁴ (1819-1868), o que o levou a se associar com Simon Newcomb (1835-1909) – astrônomo, matemático americano – em 1880 no Nautical Almanac Office em Washington, D.C., a fim de aperfeiçoar seus resultados (Shankland, 1953).

Ainda no mesmo ano, Michelson viajou para a Europa com o apoio financeiro de Graham Bell (1847-1922) – conhecido pela invenção do telefone – com a finalidade de estudar um problema comentado por James Clerk Maxwell (1831-1879) em uma carta dirigida a David Peck Todd (1855-1939) – diretor do Nautical Almanac Office – envolvendo o movimento do Sistema Solar através do éter luminífero⁵. O primeiro destino de Michelson foi em Paris, no Collège de France, no qual teve apoio de Jules Célestin Jamin (1818-1886) – físico francês com ênfase em óptica. Após algum tempo, Michelson foi para Berlim, onde passou a trabalhar com Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) (Martins, 2015; Shankland, 1953; Hamerla, 2006).

Nesse período, Michelson começou a investigar um meio para medir o movimento da Terra através do éter, um assunto em pauta na academia, mas até então não esclarecido, avivado pela carta de Maxwell. As observações que precisariam ser feitas eram de variações de tempo muito pequenas, o que exigiria medidas precisas e uma das maneiras até então mais indicada eram os métodos interferométricos. Isso levou Michelson ao desenvolvimento de um instrumento que permitisse a interferência de dois raios de luz, produzindo uma projeção das franjas interferência (ou bandas de interferência), levando-o a fazer observações de efeitos do movimento da Terra na luz com relação ao éter⁶. Após alguns meses de pesquisa, seus resultados foram publicados em 1881 pelo *American Journal of Science* (Martins, 2015; Shankland, 1953; Michelson, 1881).

O interferômetro ficou sob encargo de Franz Schmidt e Hermann Haensch⁷, mecânicos e artesãos de Berlim, Alemanha, que tinham uma companhia juntos de construção de

⁴ Jean Bernard Léon Foucault realizou um experimento para determinar a velocidade da luz em 1850 (publicado em 1862), no qual utilizava um espelho que girava (*revolving mirror*), e que será adaptado posteriormente por Michelson (Magie, 1935, p. 343). Foucault e Hippolyte Fizeau (1819-1896), fizeram estudos sobre óptica juntos na primeira metade do século XIX, mas tiveram desentendimentos e desfizeram a parceria (Frercks, 2005).

⁵ A carta de Maxwell a Todd é referente à sua tentativa de determinar a influência do vento de éter usando os satélites de Júpiter. Sugerimos a leitura de Martins (2015, pp. 67-71).

⁶ Os métodos interferométricos já eram utilizados antes de Michelson (Pimentel Jr, 2012; Martins, 2012). O esquema do interferômetro de Michelson-Morley será mostrado na tradução.

⁷ Franz Schmidt & Hermann Haensch tinham experiência na fabricação de conjuntos ópticos e espectrômetros. Segundo informações na página da companhia, existente até hoje, o pagamento do interferômetro de Michelson foi feito pela fundação de Bell. Uma imagem do interferômetro de 1881 pode ser encontrada na página da empresa: <https://schmidt-haensch.com/history/>.

instrumentos desde 1864, sendo Michelson apenas o idealizador do instrumento⁸ (Michelson, 1881; Martins, 2015). Ele era composto por um conjunto óptico central, cuja finalidade era dividir o raio vindo da fonte luminosa em dois para o caminho de ida, e colimá-los no caminho de volta (ver Figura 2 na tradução), e dois longos braços perpendiculares com tamanhos variáveis e espelhos em suas extremidades⁹. Na ida, após a divisão dos raios no centro do aparato, eles percorriam os braços perpendiculares e eram refletidos pelos espelhos em suas extremidades. No caminho de volta, ambos se encontravam no conjunto óptico central e as franjas de interferência eram observadas em um micrômetro. Além disso, também era necessário que o aparato rotacionasse, para que um dos braços ficasse em paralelo ao vento de éter previsto por Maxwell (Michelson, 1881; Martins, 2015).

Inicialmente, o primeiro teste do instrumento foi realizado na cidade de Berlim, mas devido a alguns problemas na sua estabilidade que afetavam diretamente os dados observados – fato que ficará claro na tradução a seguir – o instrumento foi transportado para a cidade de Potsdam, também na Alemanha, com o propósito de que houvesse menos interferência e assim, um novo teste foi realizado. O resultado foi um tanto inesperado por trazer observações e dados diferentes daqueles que já haviam sido feitos por outros pesquisadores e aceitos como válidos pela comunidade científica da época. Como exemplo, o experimento de Hippolyte Fizeau (1819-1896) com o interferômetro de tubos de água trouxe para a comunidade uma possível confirmação do coeficiente de arrastamento do éter de Fresnel, uma das hipóteses mais discutidas no dilema em questão (Fizeau, 1859; Martins, 2012; Silva; Silva, 2025). No entanto, os resultados do experimento de Michelson não concordaram com os resultados do experimento de Fizeau e, conseqüentemente, com o coeficiente de arrastamento do éter, nem com o éter de Fresnel, revelando talvez um possível erro na interpretação da teoria ou na execução do experimento (Martins, 2015; Shankland, 1953).

Nesse sentido, não havia questionamentos sobre qualquer uma das hipóteses sobre o éter, que apenas poderia ser de um tipo inerte (hipótese do éter de Fresnel) ou do tipo viscoso (hipótese do éter de Stokes)¹⁰ e tampouco quanto ao processo de medição utilizando um interferômetro. Isso leva a crer que o aspecto decisivo quanto à validade do experimento estava na incerteza envolvendo os dados observados. Apesar de toda estrutura do aparato, o instrumento demonstrou ser extremamente sensível, não fornecendo condições para observações precisas do efeito esperado. Esse foi o principal problema do experimento em 1881, sendo considerado um experimento inconclusivo, até mesmo para o próprio Michelson (Martins, 2015; Shankland, 1953).

⁸ Segundo Hamerla (2006, p. 138), Michelson apenas aprimorou o interferômetro de Jules Jamin, que estava num laboratório de Paris. Para mais detalhes sobre outros interferômetros, sugerimos a leitura de Pimentel Junior (2012).

⁹ Infelizmente não encontramos as medidas dos braços desse primeiro interferômetro em nenhuma das fontes teóricas ou na página da fabricante.

¹⁰ Para mais informações sobre o éter e como cada hipótese respondia aos problemas da época, sugerimos a leitura de Martins (2012; 2023).

Embora provavelmente esse “esforço perdido” tenha frustrado Michelson, o incentivo de dois importantes pesquisadores da época, William Thomson (1824-1907), conhecido como Lord Kelvin, e John William Strutt (1842-1919), conhecido como Lord Rayleigh, além de seus próprios avanços quanto à medida da velocidade da luz – chegando inclusive a valores muito próximos daquele aceito atualmente – contribuíram para que ele retornasse à investigação do tema de seu trabalho em 1886. Dessa vez, quanto à parte instrumental, Michelson vai contar com a contribuição de Edward Williams Morley (1838-1923) – professor de química geral e análise quantitativa da Adebart College of Western Reserve University (Cleveland, Ohio, USA), um físico com distinção na precisão de medidas, segundo Hamerla (2006).

Morley viveu um contexto diferente de Michelson, sem participação em universidades europeias e autodidata na pesquisa científica. Por outro lado, se tornou um renomado projetista e construtor de instrumentos (Hamerla, p. 58, 2006). Segundo Hamerla (2006), Morley se envolveu com pesquisa num período não favorável em comparação a outros estudiosos que são mais evidenciados na história da ciência. Quando autodidatas alcançavam o reconhecimento, como o caso de Michael Faraday (1791-1867) (Dias; Martins, 2004), Morley estava tendo sua formação teológica¹¹; posteriormente, se envolveu na Guerra da Secessão (1861-1865), e quando iniciou sua carreira como “cientista”, os critérios para reconhecimento na academia já eram outros.

Além disso, cabe lembrar que os Estados Unidos da América no século XIX era uma colônia em ascensão e a ciência não tinha a mesma tradição do que já ocorria na Europa desde o século XVII, e, portanto, estabelecer-se como pesquisador experimental era um caminho novo e difícil de ser trilhado (Hamerla, 2006, p. 93). Em sua carreira, Morley passou por diferentes laboratórios, ficando responsável desde a obtenção das verbas para aquisição e manutenção, até a construção e manipulação dos instrumentos para as suas pesquisas. O último laboratório antes de sua aposentadoria foi em Cleveland, onde Morley recebeu o jovem Michelson que retornava da Europa com o resultado incerto do primeiro interferômetro.

Após participarem de um evento em Montreal em 1884, no qual foram discutidos trabalhos envolvendo a hipótese da luz como onda eletromagnética de Maxwell, Morley e Michelson começaram a trabalhar juntos numa forma de aprimorar as medidas e obter uma resposta definitiva sobre o tipo de éter (Hamerla, 2006, p. 141). Acontece aí a junção de duas gerações diferentes de cientistas: um que foi formado na prática, com expertise na parte experimental; e o outro, que já tinha a experiência da pesquisa teórica, o conhecimento de laboratórios europeus e retornava com financiamento¹² e destaque acadêmico.

¹¹ Morley era de família protestante, filho e sobrinho de ministros, e teve formação inicial em teologia para também se tornar ministro (Clarke, 1924; Hamerla, 2006).

¹² Michelson volta aos EUA com excelentes referências, um emprego no Case Institute of Technology, em Cleveland, um orçamento generoso para equipar o laboratório e importar equipamentos da Europa (Hamerla, 2006, p. 140).

A primeira decisão tomada por Morley e Michelson foi de investigar o experimento de Fizeau¹³ através de uma reprodução, a fim de entender o fenômeno e concluir se o resultado do experimento era válido, o que contribuiria para melhor compreensão do resultado nulo do experimento de 1881 (Michelson; Morley, 1886). Com algumas modificações para ter maior controle e medidas do fluxo de água, eles obtiveram resultados que concordavam com a hipótese do éter de Fresnel e indicavam a validade do trabalho de Fizeau (Martins, 2015). Segundo Michelson e Morley,

o resultado desse trabalho é, portanto, que o resultado anunciado por Fizeau é essencialmente correto; e o éter luminífero não é afetado totalmente pelo movimento da matéria que o permeia. (Michelson; Morley, 1886, p.386, tradução nossa).

Até então, a hipótese do éter de Stokes¹⁴ era a melhor hipótese para explicar o resultado nulo do experimento de Michelson em 1881. Contudo, agora em 1886, com a repetição do experimento de Fizeau, ao obter os mesmos resultados que apontavam para a validade da hipótese de Fresnel, havia um impasse. Não se sabia se o experimento de 1881 indicava um erro na concepção teórica que se tinha, ou se os erros experimentais atrapalharam na obtenção dos resultados

Dessa forma, em 1887, Michelson e Morley seguiram a mesma direção daquela tomada no primeiro experimento e continuaram utilizando os métodos interferométricos. Desenvolveram um segundo interferômetro, agora com uma estrutura que priorizava a estabilidade das franjas de interferência para, consequentemente, facilitar a observação do efeito esperado (Martins, 2015). Diferentemente do primeiro, este segundo interferômetro foi construído por Morley, o que provavelmente agregou mais habilidades e precisão, já que essa era sua expertise. O equipamento era composto por um conjunto óptico de espelhos nas extremidades e vidros divisores de feixes no centro de uma pedra quadrada de um metro e meio e 30 centímetros de espessura flutuando sobre o mercúrio, a fim de garantir o máximo de estabilidade possível e o mínimo de sensibilidade às influências externas (como as próprias pisadas), o qual pode ser visto na Figura 3.

As franjas de interferência eram formadas após o encontro no centro dos vários raios de luz refletidos pelos espelhos e observadas por um telescópio. Nessa tentativa, eles apostaram em aumentar o número de reflexões imaginando que o raio percorreria um espaço maior antes de interferir com o outro e não seria necessário seguir o modelo do experimento anterior com braços longos, o que poderia ter sido uma das causas da instabilidade do aparato. Na nova versão, o instrumento também tinha a capacidade de rotacionar, agora, de um modo muito mais

¹³ O experimento de Fizeau determinou o coeficiente de arrastamento do éter por corpos transparentes, sendo favorável ao éter de Fresnel (Silva; Silva, 2025).

¹⁴ Segundo a hipótese de Stokes, o éter seria viscoso e aderiria à superfície terrestre, sendo o mesmo referencial da Terra. Estando éter e Terra no mesmo referencial, não haveria deslocamento das franjas pelo método interferométrico (Martins, 2023).

fácil tendo em vista que ele flutuava no mercúrio (Michelson; Morley, 1887; Martins, 2015; Shankland, 1953).

Com o instrumento pronto, Michelson e Morley fizeram observações durante quatro dias e também num intervalo de meses a fim de encontrar o deslocamento proposto pela hipótese de Fresnel de 0.04 da distância entre as franjas de interferência, algo que agora poderia ser relativamente obtido com facilidade, uma vez que o aparato fornecia as condições necessárias para observação estável do efeito. Contudo, apenas algumas variações irregulares foram observadas entre franjas de interferência e nenhum deslocamento significativo próximo ao efeito esperado teoricamente foi observado. A conclusão que ambos tiveram era que esse resultado era nulo, o que implicava dizer que a hipótese de Fresnel não era válida e a hipótese de Stokes era a mais ideal para explicar o resultado obtido (Martins, 2015; Shankland, 1953).

Posteriormente, outros pesquisadores também analisaram, de forma independente, esse resultado, como é o caso de George Francis FitzGerald (1851-1901) e Hendrik Antoon Lorentz (1853-1828)¹⁵, e conjecturaram outra possível causa para resultado nulo com relação a hipótese de Fresnel, levando em conta a contração do comprimento, porém ainda não se sabia ao certo como isso ocorreria. Segundo Martins (2015):

Na época, não havia nenhum motivo físico para imaginar que o movimento dos corpos através do éter deveria mudar suas dimensões. Tanto FitzGerald quanto Lorentz estavam, provavelmente, se guiando simplesmente pela ideia de que alguma coisa poderia estar cancelando o efeito do vento do éter, e imaginaram então esse efeito de contração (Martins, 2015, p. 75).

Esse resultado inesperado é um dos motivos desse experimento ser considerado importante no que tange o desenvolvimento da física moderna e é costumeiramente apresentado em capítulos iniciais sobre teoria da relatividade restrita em livros didáticos. Porém, nem sempre a abordagem feita remete ao contexto histórico a partir do instrumento. Quando o experimento interferométrico de Michelson-Morley é abordado em laboratório, é apresentado como um instrumento de medidas de comprimentos de onda da fonte luminosa (Campos et. al, 2008), conforme sugere o próprio manual de uma empresa de kits didáticos (Catelli; Ramos, 2014). Acreditamos que tal associação se dê porque, após o experimento envolvendo o movimento da Terra em relação ao éter, ainda no mesmo ano, Michelson e Morley continuaram trabalhando juntos e utilizaram o mesmo equipamento para investigar um método para obter o comprimento de onda da luz de sódio e chegaram a um resultado satisfatório, publicando também no American Journal of Science (Michelson, Morley, 1887a; Shankland, 1953).

¹⁵ Tanto Lorentz quanto de FitzGerald levam em consideração outros estudos que ocorriam paralelamente na época, como os estudos moleculares e a relação carga/massa do elétron (Martins, 2005; Martins, 2023), sempre assumindo a presença do éter. Após o resultado do experimento de Heinrich Hertz (1857-1894), corroborando a hipótese da luz como onda eletromagnética, a determinação do tipo de éter trazia implicações também para o eletromagnetismo, área em que se desenvolvem os trabalhos de Lorentz, FitzGerald e outros (Whittaker, 1987, p. 404)

III. Sobre o movimento relativo da Terra e o éter luminífero – tradução e análise

A versão utilizada nesta tradução corresponde ao artigo publicado no *American Journal of Science*, em 1887 (Michelson; Morley, 1887). Também usamos para comparação a versão presente em Magie (1935, p. 369) e as análises de fontes secundárias já existentes na literatura para entender procedimentos e situações experimentais relatadas pelos autores (Martins, 2012; 2015; 2023; Pimentel Jr, 2012). As notas dos autores estão descritas em [N.A.] e as dos tradutores em [N.T.]. A paginação original está entre colchetes ao longo do texto. A numeração das figuras que seguem a sequência deste trabalho, estão como “Fig”; enquanto que as figuras com a numeração da fonte primária estão como “fig”.

[333] Art. XXXVI – Sobre o movimento relativo da Terra e o Éter luminífero; por Albert A. Michelson e Edward W. Morley¹⁶

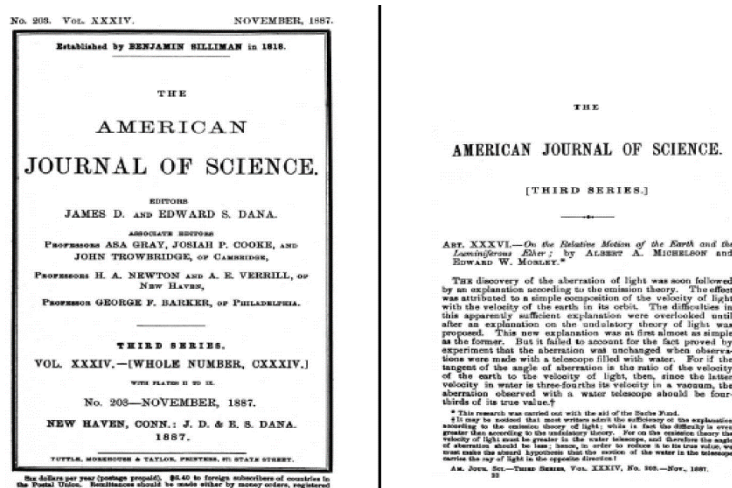


Fig. 1 – Capa da *American Journal of Science* e primeira página do artigo, respectivamente. Como sinais de profissionalização da ciência no final do século XIX e das mudanças nas práticas científicas, o periódico informa no rodapé como é possível adquiri-lo, incluindo o pagamento e a remessa¹⁷, diferenciando da comunicação dos séculos anteriores, que se davam por cartas. Fonte: *American Journal of Science* (<https://ajsonline.org/>).

¹⁶ [N.A.] Esta pesquisa foi realizada com o auxílio do Bache Fund. [N.T.] É de se observar a citação de um fundo de financiamento para o trabalho, o que já caracteriza a ciência do final do século XIX e começo do século XX. O Bache Fund foi criado por um investidor da bolsa de Nova York e, em 1887, era gerido pelo Smithsonian Institute.

¹⁷ [N.T.] Informação da nota de rodapé na capa da revista: “Seis dólares por ano (envio pago). \$6,40 para assinantes estrangeiros em países da União Postal. As remessas devem ser feitas por ordens de pagamento, cartas registradas ou cheques bancários”. Além de já se caracterizar uma ideia de ciência próxima ao que temos hoje, também indica como o público vai se tornando mais especializado.

A descoberta da aberração da luz foi logo seguida por uma explicação baseada na teoria da emissão¹⁸. O efeito foi atribuído à simples composição da velocidade da luz com a velocidade da Terra em sua órbita. As dificuldades dessa explicação, aparentemente suficiente, foram ignoradas até que se propusesse uma explicação fundamentada na teoria ondulatória da luz. Essa nova explicação era, a princípio, quase tão simples quanto a anterior. No entanto, falhava em justificar o fato, comprovado por experimentos, de que a aberração permanecia inalterada quando as observações eram realizadas com um telescópio cheio de água¹⁹. Pois, se a tangente do ângulo de aberração for a razão entre a velocidade da Terra e a velocidade da luz, então, visto que esta última é reduzida a três quartos de seu valor no vácuo ao passar pela água, a aberração observada com um telescópio aquático deveria ser quatro terços de seu valor real²⁰.

[334] Na teoria ondulatória, de acordo com Fresnel, primeiro, supõe-se que o éter permanece em repouso, exceto no interior dos meios transparentes, nos quais em segundo lugar, presume-se que [o éter] se mova com uma velocidade inferior à do meio, na razão de $\frac{n^2-1}{n^2}$, sendo n o índice de refração. Essas duas hipóteses fornecem uma explicação completa e satisfatória para a aberração. A segunda hipótese, apesar de sua aparente improbabilidade, deve ser considerada plenamente comprovada²¹, primeiramente pelo célebre experimento de Fizeau²² e, em segundo lugar, pela ampla confirmação proporcionada por nossos próprios trabalhos²³. A verificação experimental da primeira hipótese constitui o objeto do presente estudo.

¹⁸ [N.T.] Por aberração da luz, os autores devem estar se referindo à diferença angular entre a posição “real” de uma estrela e a posição em que ela é vista da Terra, devido à velocidade finita da luz, a distância que a estrela se encontra e o movimento orbital da Terra (Martins, 2023, p. 150). A teoria da emissão “concebe a luz como uma sequência de partículas, movendo-se rapidamente, que estão sujeitas a forças exercidas por corpos materiais” (Buchwald, 1989, p. xiii). A teoria da emissão também pode ser encontrada em alguns autores como “teoria corpuscular” (Whittaker; 1987; Cantor, 1978), com o mesmo significado, e em oposição à teoria ondulatória da luz (Buchwald, 1989; Darrigol; 2012) como os autores explicam na sequência. Adotando a teoria ondulatória (éter luminífero), a aberração foi um dos desafios na definição entre o éter de Fresnel e o de Stokes, conforme salienta Martins (2012; 2023).

¹⁹ [N.T.] Trata-se dos experimentos de Airy em 1871 (Pimentel Jr., 2012, p. 145). O experimento com tubos preenchidos com água visava identificar o efeito do éter luminífero num meio transparente. A aberração das estrelas ficava muito mais difícil de ser explicada com a hipóteses do éter de Stokes (Martins, 2012).

²⁰ [N.A.] Nota-se que a maioria dos autores admite a suficiência da explicação baseada na teoria da emissão da luz; contudo, na realidade, a dificuldade é ainda maior do que na teoria ondulatória. Pois, segundo a teoria da emissão, a velocidade da luz deveria ser maior no telescópio cheio de água e, portanto, o ângulo de aberração deveria ser menor; assim, para que este se reduzisse ao seu valor real, seria necessário adotar a hipótese absurda de que o movimento da água no telescópio arrastaria o raio de luz na direção oposta! [N.T.] É de se observar que a diferença de resultados para a aberração da luz usando Fresnel ou Stokes é um problema de conhecimento dos autores e, portanto, fazia parte do contexto em que a investigação estava sendo realizada.

²¹ [N.T] O trecho possibilita uma discussão sobre a relação entre o conhecimento teórico e prático, não sendo a prática submissa ao campo teórico, mas sendo campos que se complementam (Sibum, 2004).

²² [N.A.] *Comptes Rendu*, xxxiii, 349, 1851; *Pogg. Ann. Ergänzungsband*, vii, 457, 1853; *Ann. Chim. Phys.*, III, vii, 385, 1859.

²³ [N.A.] Influence of Motion of the Medium on the velocity of light. *American Journal of Science*, III, xxxi, 377, 1886.

Se a Terra fosse um corpo transparente, poder-se-ia talvez admitir, em vista dos experimentos recém citados, que o éter intermolecular²⁴ permanece em repouso no espaço, apesar do movimento da Terra em sua órbita; contudo, não temos o direito de estender a conclusão desses experimentos aos corpos opacos. Mas dificilmente pode ser questionado que o éter pode e consegue passar através de metais. Lorentz cita o exemplo de um tubo barométrico metálico. Quando o tubo é inclinado, o éter no espaço acima do mercúrio é certamente expelido, pois é incompressível²⁵. No entanto, novamente, não temos o direito de presumir que ele escape com total liberdade e, caso haja qualquer resistência, ainda que pequena, certamente não poderíamos supor que um corpo opaco como toda a Terra ofereça livre passagem [para o éter] através de sua massa inteira. Mas como Lorentz apropriadamente observa: "De qualquer forma, na minha opinião, será prudente não se deixar guiar, em uma questão tão importante, por considerações sobre o grau de probabilidade ou simplicidade de uma ou outra hipótese, mas sim recorrer à experiência para aprender a conhecer o estado, de repouso ou movimento, no qual se encontra o éter na superfície terrestre"²⁶.

Em abril de 1881, foi proposto e realizado um método para testar a questão experimentalmente²⁷.

Ao deduzir a fórmula para a quantidade a ser medida, o efeito do movimento da Terra através do éter no caminho do raio em ângulo reto com esse movimento foi negligenciado²⁸.

[335] A discussão sobre essa falha e sobre todo o experimento constitui o tema de uma análise muito investigativa de H. A. Lorentz²⁹, que conclui que esse efeito de forma alguma pode ser desconsiderado. Em consequência, a quantidade a ser medida tinha, de fato, apenas metade do valor suposto, e como já estava apenas ligeiramente além dos limites dos erros do experimento, a conclusão esboçada a partir do resultado do experimento poderia ser questionada; no entanto, como a parte principal da teoria permanece inquestionada, decidiu-se repetir o experimento com modificações tais que garantiriam um resultado teórico muito grande para ser mascarado por erros experimentais. A teoria do método pode ser brevemente descrita como segue:

²⁴ [N.T.] O éter ocupa todos os espaços, portanto está também entre as moléculas. Isso tem uma implicação na proposição posterior de Lorentz da contração do espaço percorrido pela luz (braço do interferômetro) (Lorentz, 1895).

²⁵ [N.A.] Pode-se argumentar que ele [éter] poderia escapar pelo espaço entre o mercúrio e as paredes; mas isso poderia ser prevenido amalgamando as paredes.

²⁶ [N.A.] *Archives Néerlandaises*, xxi, 2º livr. [N.T.] Tradução nossa; os autores trazem o trecho em francês. A afirmativa de Lorentz dá indícios de sua visão de ciência, da necessidade de ter respostas precisas, e absolutas, para a validação de teorias, e o papel da experimentação.

²⁷ [N.A.] The relative motion of the earth and the luminiferous ether, por Albert A. Michelson, neste *Journal*, III, xxii, 120.

²⁸ [N.A.] Pode-se mencionar aqui que o erro foi apontado ao autor do trabalho anterior por M. A. Potier, de Paris, no inverno de 1881.

²⁹ [N.A.] *De l'Influence du Mouvement de la Lum. Terre sur les Phen.* *Archives Néerlandaises*, xxi, 2º livr., 1886.

Seja sa , na fig. 1 [Figura 2]³⁰, um raio de luz que é parcialmente refletido em ab e parcialmente transmitido em ac , sendo retornado pelos espelhos b e c , ao longo de ba e ca . [O raio] ba é parcialmente transmitido ao longo de ad , e ca é parcialmente refletido ao longo de ad . Se, então, os caminhos ab e ac forem iguais, os dois raios interferirão ao longo de ad . Suponha agora, o éter estando em repouso, que todo o aparato se mova na direção sc , com a velocidade da Terra em sua órbita, [336] as direções e as distâncias percorridas pelos raios serão alteradas, assim: o raio sa é refletido ao longo de ab , fig. 2; o ângulo³¹ bab' , sendo igual à aberração $= a$, é retornado ao longo de ba' ($aba' = 2a$) e dirige-se ao foco do telescópio, cuja direção é inalterada.

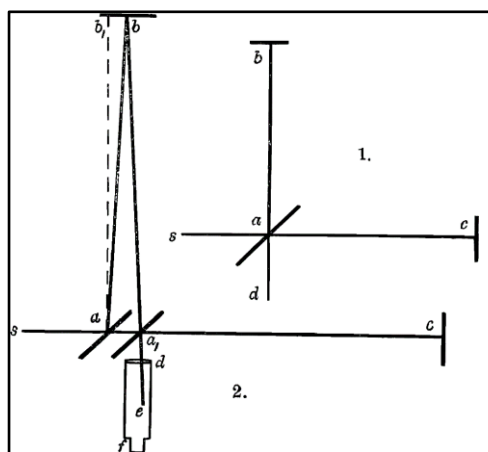


Fig. 2 – fig. 1 e fig. 2³². Fonte: Michelson; Morley, 1887, p. 335.

O raio transmitido segue ao longo de ac , é retornado ao longo de ca' e é refletido em a' , tornando $ca'e$ igual a $90 - a$, e, portanto, ainda coincide com o primeiro raio. Pode-se observar que os raios ba' e ca' já não se encontram exatamente no mesmo ponto a' , embora a diferença seja de segunda ordem; isso não afeta a validade do raciocínio. Agora é necessário determinar a diferença entre os dois caminhos aba e aca' .

Seja V = velocidade da luz; v = velocidade da Terra em sua órbita; D = distância ab ou ac , fig. 1 [Fig. 2]; T = tempo que a luz leva para passar de a a c ; T' = tempo que a luz leva para retornar de c a a' , (fig. 2).

Quando $T = \frac{D}{V-v}$, $T' = \frac{D}{V+v}$. Todo o tempo de ida e volta é $T + T' = 2D \frac{V}{V^2 - v^2}$, e a distância viajada nesse tempo é $2D \frac{V^2}{V^2 - v^2} = 2D \left(1 + \frac{v^2}{V^2}\right)$, negligenciando termos da quarta ordem. O comprimento do outro caminho é evidentemente $2D \sqrt{1 + \frac{v^2}{V^2}}$, ou com o mesmo grau

³⁰ [N.T.] Adotaremos fig, em minúsculo, para as citações de figura do texto original; enquanto que neste trabalho a sequência de Figuras será indicada por Fig.

³¹ [N.T.] Os autores usam o índice como subscrito, o que causa confusão. Assim, optamos por trocar b' por b' .

³² [N.T.] Esquema de funcionamento do interferômetro.

de precisão, $2D \left(1 + \frac{v^2}{2V^2}\right)$. A diferença é portanto, $D \frac{v^2}{V^2}$. Se agora todo o aparato for girado em 90° , a diferença será na direção oposta, portanto, o deslocamento das franjas de interferência deverá ser $2D \frac{v^2}{V^2}$. Considerando apenas a velocidade da Terra em sua órbita, isso seria $2D \times 10^{-8}$. Se, como no caso do primeiro experimento, $D = 2 \times 10^6$ ondas de luz amarela, o deslocamento esperado seria 0,04 da distância entre as franjas de interferência.

No primeiro experimento, uma das principais dificuldades encontradas foi a de girar o aparato sem produzir distorções; e outra foi sua extrema sensibilidade à vibração. Essa [sensibilidade] era tão grande que era impossível ver as franjas de interferência exceto em breves intervalos quando [estávamos] trabalhando na cidade, mesmo às duas horas da manhã. Finalmente, como observado anteriormente, a quantidade a ser observada, nominalmente, um deslocamento de algo menor que um vigésimo da distância entre as franjas de interferência pode ter sido pequena demais para ser detectada quando mascarada pelos erros experimentais³³.

[337] As primeiras dificuldades mencionadas foram inteiramente superadas ao montar o aparato sobre uma pedra maciça flutuando em mercúrio³⁴; e a segunda ao aumentar, por meio de reflexões sucessivas, o percurso da luz para cerca de dez vezes seu valor anterior.

O aparato está representado em perspectiva na fig. 3 [Figura 3], em plano na fig. 4 [Figura 4] e em seção vertical na fig. 5 [Figura 5]. A pedra *a* (Fig. 5) tem cerca de 1,5 m² e 0,3 m de espessura. Ela repousa sobre um flutuador anular de madeira *bb*, com 1,5 m de diâmetro externo, 0,7 m de diâmetro interno e 0,25 m de espessura. O flutuador, por sua vez, repousa sobre mercúrio contido na calha de ferro fundido *cc*, com 1,5 cm de espessura, nestas dimensões há uma folga de cerca de 1cm ao redor do flutuador³⁵. Um pino *d*, guiado pelos braços *gggg*, encaixa-se em um soquete *e* acoplado ao flutuador [Fig. 5]. O pino pode ser inserido no soquete ou ser retirado por meio de uma alavanca articulada em *f*. Esse pino mantém o flutuador concêntrico com a calha, mas não suporta qualquer parte do peso da pedra. A calha anular de ferro repousa sobre uma base de cimento em um pilar baixo de tijolos construído na forma de um octógono oco.

Em cada canto da pedra foram colocados quatro espelhos *dd ee* (Fig. 4). Próximo ao centro da pedra estava um vidro plano-paralelo *b*. Eles foram dispostos de modo que a luz proveniente de uma lâmpada de Argand³⁶ *a*, passando por uma lente, incidisse em *b* como para

³³ [N.T.] Conforme Martins (2023), o deslocamento entre as franjas era praticamente da espessura do objeto usado como indicador, impossibilitando uma medida precisa.

³⁴ [N.T.] O mercúrio tinha a função de garantir que a base permaneceria plana e não sofreria abalo com a vibração. Cabe ressaltar que o mercúrio era usado com facilidade em vários experimentos durante o século XIX, o que não seria mais possível hoje, principalmente se fosse algo de caráter didático.

³⁵ [N.T.] A pedra flutua com garantia de não tocar nas paredes da calha em que está o mercúrio, garantindo que não haja obstáculo no movimento de rotação que o conjunto todo deve realizar durante as observações.

³⁶ [N.T.] Lâmpada de Argand (Argand burner) era uma das mais comumente utilizadas em experimentos por permitir o total controle da chama. Nessa lâmpada, a chama produzida adquire o formato cilíndrico, utilizando a queima de gás a baixa pressão, o que permite a uniformidade da chama e redução do consumo (Merriman, p. 44, 1884). De qualquer forma, tratava-se de uma fonte difusa de luz, e por isso a lente precisava colimar.

ser em parte refletida para d' . Os dois raios seguiram os percursos indicados na figura 4, $bdedbf$ e $bd'e'd'bf$ respectivamente, e foram observados pelo telescópio f . Tanto f quanto a giravam com a pedra. Os espelhos eram feitos de metal espelhado³⁷ cuidadosamente trabalhados para superfícies opticamente planas com cinco centímetros de diâmetro, e vidros b e c eram plano-paralelos e de mesma espessura de 1,25 centímetros. [338] Suas superfícies mediam 5,0 por 7,5 centímetros. O segundo desses vidros foi colocado no caminho de um dos raios para compensar a passagem do outro através da mesma espessura de vidro. Toda a porção óptica do aparato foi mantida coberta com uma cobertura de madeira para prevenir correntes de ar e rápidas mudanças de temperatura³⁸.

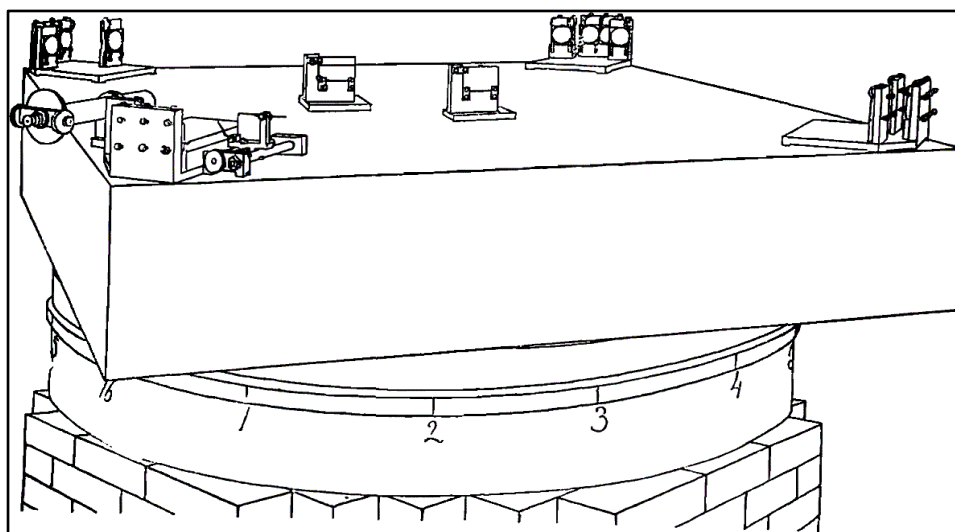


Fig. 3 – Representação do aparato experimental em perspectiva 3D. Fonte: Michelson; Morley, 1887, p. 337.

O ajuste foi realizado como segue: os espelhos foram ajustados por parafusos³⁹ nas fundições que seguravam os espelhos, contra os quais eram pressionados por molas, até que a luz proveniente de ambos os raios pudesse ser visível no telescópio, as distâncias dos dois percursos foram medidas por uma fina vara de madeira estendida diagonalmente de espelho a espelho, sendo a distância lida a partir de pequena régua de aço para décimos de milímetros. A diferença nas distâncias dos dois percursos foi então anulada pelo movimento do espelho e' . Este espelho possui três ajustes; tinha um ajuste em altitude e um em azimute, como todos os outros espelhos, [339] porém mais fino [ajuste fino]; ele também possuía um ajuste na direção

³⁷ [N.T.] “Speculum metal” corresponde a uma peça de vidro com uma certa espessura, onde era depositada uma camada muito fina de metal que servia para a reflexão, funcionando como espelhos.

³⁸ [N.T.] Nos desenhos não há nenhum indicativo de como seria essa cobertura e quais os furos necessários para ter acesso aos espelhos.

³⁹ [N.T.] Os autores neste trabalho não destacam o tipo de parafuso, mas analisando trabalhos anteriores, no caso o primeiro experimento feito por Michelson (1881), provavelmente são parafusos micrométricos precisos.

do raio incidente, deslizando para frente ou para trás, mas mantendo-se muito precisamente paralelo ao seu plano anterior. Os três ajustes desse espelho podiam ser feitos com a cobertura de madeira em posição.

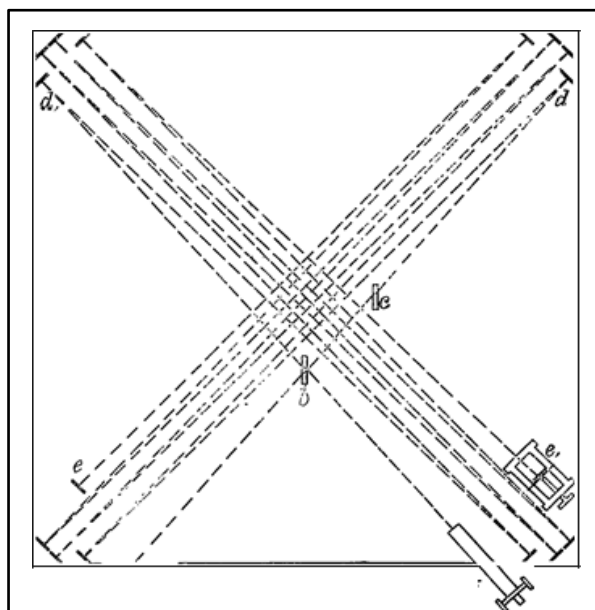


Fig. 4 – Ilustração do interferômetro em perspectiva plana, vista superior. Fonte: Michelson; Morley, 1887, p. 338.

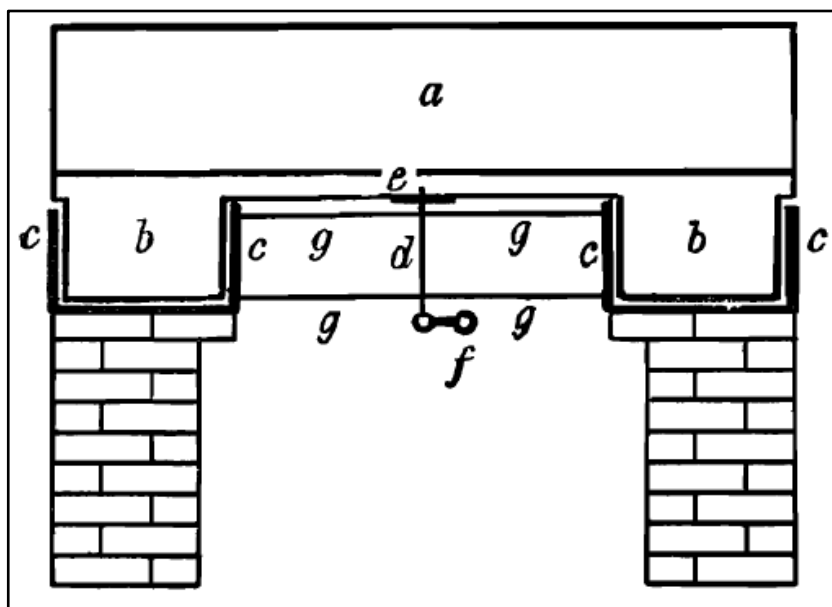


Fig. 5 – Ilustração plana vertical do interferômetro. Fonte: Michelson; Morley, 1887, p. 339.

Os percursos agora sendo aproximadamente iguais, as duas imagens da fonte de luz ou de algum objeto facilmente percebido colocado em frente à lente condensadora, eram feitos para coincidir; o telescópio foi então ajustado para uma visão nítida das bandas de interferência esperadas, e a luz de sódio foi substituída por luz branca, quando as bandas de interferência apareceram. Estas foram agora feitas tão nítidas quanto possível por meio do ajuste do espelho *e'*; quando a luz branca foi restaurada, o parafuso que alterava o comprimento do percurso foi movido muito lentamente (uma volta de um parafuso de cem fios por polegada alterando o percurso em quase 1000 comprimentos de onda) até que as franjas coloridas de interferência reapareceram na luz branca⁴⁰. Estas foram determinadas para uma largura e posição convenientes, e o aparato estava pronto para observação.

As observações foram conduzidas como segue. Ao redor da calha de ferro fundido, estavam dezesseis marcas equidistantes. O aparato era girado muito lentamente (uma volta em seis minutos) e depois de alguns minutos o fio cruzado do micrômetro era ajustado na mais nítida das franjas de interferência no instante em que [o aparato] passava por uma das marcas. O movimento era tão lento que isso podia ser feito pronta e precisamente. A leitura da cabeça do parafuso no micrômetro era anotada, e um impulso muito leve e gradual era dado para manter o movimento da pedra; ao passar pela segunda marca, o mesmo processo era repetido, e isso era continuado até o aparato ter completado seis revoluções. Foi encontrado que ao manter o aparato em lento movimento uniforme, os resultados eram muito mais uniformes e consistentes do que quando a pedra era trazida para o repouso para toda observação; para os efeitos das tensões podia ser notado por pelo menos um minuto depois da pedra parar, e durante esse tempo efeitos da mudança de temperatura entravam em ação⁴¹.

As tabelas⁴² [Fig. 6] seguintes fornecem as médias das seis leituras; a primeira, por observações feitas próximo ao meio-dia, a segunda, àquelas feitas próximo das seis horas da tarde. As leituras são divisões das cabeças dos parafusos [micrométricos]. A largura das franjas variou a partir de 40 para 60 divisões, o valor médio próximo de 50, sendo que uma divisão [340] equivale a 0,02 do comprimento de onda. A rotação nas observações ao meio-dia era anti-horária, e nas observações noturnas, horária.

⁴⁰ [N.T.] Observar que, sendo a fonte de luz branca, colimada com a lente, a interferência forma franjas coloridas, um resultado bem diferente do obtido atualmente, quando a fonte é monocromática, como o laser.

⁴¹ [N.T.] Interessante observar como Michelson e Morley tentam cobrir todas as possíveis variáveis que podem interferir no resultado, como as correntes de ar (mantendo o conjunto coberto) e a diferença de temperatura causada pelo atrito na rotação do conjunto. Tais variáveis demonstram a expertise de Morley na elaboração do experimento, e também planejamento e conhecimentos teóricos prévios sobre o que poderia ocasionar diferenças na leitura das franjas.

⁴² [N.T.] A presença de tabelas e gráficos também é um diferencial nas práticas científicas a partir da segunda metade do século XIX. Antes disso, os trabalhos com relatos experimentais focavam no fenômeno com uma análise qualitativa, ou seja, bastava confirmar o que “acontecia” e em “quais condições”, como no caso dos outros interferômetros (ver Pimentel Jr, 2012). Preocupações com número de medidas, variáveis, e análise de erros (accuracy) já demonstram a especialização da área experimental da física e a ênfase no “método científico”.

A curva superior é para as observações ao meio-dia, e a inferior para as observações ao final da tarde. As curvas pontilhadas representam um oitavo dos deslocamentos teóricos. Parece justo concluir a partir da figura que se houver qualquer deslocamento devido ao movimento relativo da Terra e do éter luminífero, este não pode ser muito maior que 0,01 da distância entre as franjas.

NOON OBSERVATIONS.																
	16.	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	14.	15.
July 8	44.7	44.0	43.5	39.7	35.2	34.7	34.3	32.5	28.2	26.2	23.8	23.2	20.3	18.7	17.5	13.7
July 9	57.4	57.3	58.2	50.2	58.7	60.2	60.8	62.0	61.5	63.3	65.8	67.3	69.7	70.7	73.0	72.2
July 11	27.3	23.5	22.0	19.3	19.2	19.3	18.7	18.8	16.2	14.3	13.3	12.8	13.3	12.3	10.2	6.5
Mean	43.1	41.6	41.2	39.4	37.7	38.1	37.9	37.8	35.3	34.6	34.3	34.4	33.9	33.6	31.4	30.8
Mean in w. l.	.862	.832	.824	.788	.754	.762	.758	.756	.706	.692	.686	.688	.688	.678	.672	.616
Final mean.	.784	.762	.755	.738	.721	.720	.715	.692	.661							

P. M. OBSERVATIONS.																
July 8	61.2	63.3	63.3	68.2	67.7	69.3	70.3	69.8	69.0	71.3	71.3	70.5	71.2	71.2	70.5	75.7
July 9	26.0	26.0	28.2	29.2	31.5	32.0	31.3	31.7	33.0	35.8	36.5	37.3	38.8	41.0	42.7	44.0
July 12	66.8	66.5	66.0	64.3	62.2	61.0	61.3	59.7	58.2	55.7	53.7	54.7	55.0	58.2	58.5	56.0
Mean	51.3	51.9	52.5	53.9	53.8	54.1	54.3	53.7	53.4	54.3	53.8	54.2	55.0	56.8	57.2	58.6
Mean in w. l.	1.026	1.038	1.050	1.078	1.076	1.082	1.086	1.074	1.068	1.086	1.076	1.084	1.100	1.136	1.144	1.172
Final mean.	1.047	1.062	1.063	1.081	1.088	1.109	1.115	1.114	1.120							

Fig. 6 – Tabelas com as médias das leituras realizadas. Fonte: Michelson; Morley, 1887, p. 340.

Os resultados das observações estão representados graficamente na fig. 6 [Fig. 7].

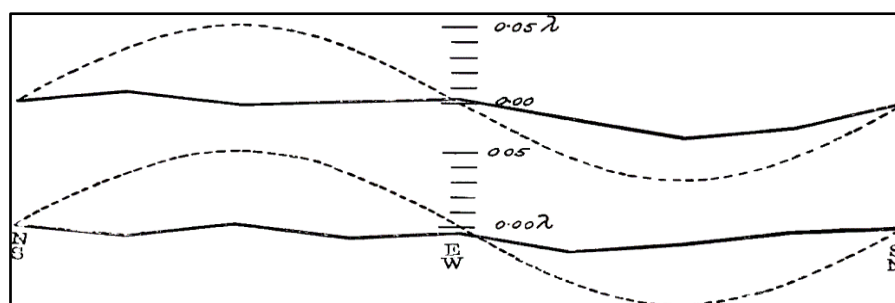


Fig. 7 – fig. 6. Fonte: Michelson; Morley, 1887, p. 340.

Considerando apenas o movimento da Terra em sua órbita, esse [341] deslocamento deveria ser $2D \frac{v^2}{v^2} = 2D \times 10^{-8}$. A distância D era de cerca de onze metros, ou 2×10^{-7} comprimentos de onda de luz amarela⁴³; assim, o deslocamento esperado era de 0,4 de franja. O deslocamento real foi certamente inferior que a vigésima parte disso, e provavelmente menor que a quarta parte. Porém, uma vez que o deslocamento é proporcional ao quadrado da

⁴³ [N.T.] Estudos sobre espectroscopia já eram conhecidos desde o início do século XVIII e, portanto, já havia uma ideia inicial sobre os diferentes comprimentos de onda associados aos elementos (Pifer *et. al*, 2025).

velocidade, a velocidade relativa da Terra e do éter é provavelmente menor que um sexto da velocidade orbital da Terra, e certamente menor que um quarto.

No que precede, apenas o movimento orbital da Terra é considerado. Se este é combinado com o movimento do sistema solar⁴⁴, sobre o qual ainda se sabe pouco com certeza, o resultado teria de ser modificado; e isso apenas é possível que a velocidade resultante no momento das observações fosse pequena embora as probabilidades sejam muito contrárias a isso. O experimento será, entretanto, repetido em intervalos de três meses, e assim toda incerteza será evitada⁴⁵.

Parece, por tudo o que precede, razoavelmente certo que se houver qualquer movimento relativo entre a Terra e o éter luminífero, este deve ser pequeno; tão pequeno o suficiente para refutar inteiramente a explicação de Fresnel sobre a aberração. Stokes forneceu uma teoria da aberração a qual pressupõe o éter na superfície terrestre estando em repouso com respeito à última, e apenas requer além disso que a velocidade relativa tenha um potencial; porém Lorentz demonstra que essas condições são incompatíveis. Lorentz então propõe uma modificação a qual combina algumas ideias de Stokes e Fresnel, e assume a existência de um potencial, junto com o coeficiente de Fresnel⁴⁶. Se agora fosse legítimo concluir a partir do presente trabalho que o éter está em repouso com respeito à superfície terrestre, de acordo com Lorentz não poderia haver um potencial de velocidade, e sua própria teoria também falharia.

Suplemento

É óbvio a partir do que já foi dito antes, que seria sem esperança tentar resolver a questão do movimento do sistema solar por observações de fenômenos ópticos *na superfície da Terra*. Porém não é impossível que mesmo em distâncias moderadas acima do nível do mar, no topo de um pico montanhoso isolado, por exemplo, o movimento relativo possa ser perceptível em um aparato como o usado nesses experimentos. Talvez se o experimento for testado nessas circunstâncias, a cobertura deva ser de vidro, ou deveria ser removida⁴⁷.

⁴⁴ [N.T.] É sempre bom lembrar que os experimentos de interferometria tinham como objetivo medir o movimento da Terra em relação ao éter. Portanto, trata-se de um problema com aspectos gravitacionais e relativo ao uso de referenciais inerciais nas leis da gravitação (Martins, 2015). A adoção de um espaço absoluto por Newton eliminava esse tipo de problema na dedução das leis da gravitação; porém, considerar a luz uma onda trazia de volta a necessidade de determinar um referencial para a luz proveniente das estrelas.

⁴⁵ [N.T.] O que equivale ao período de cada estação, ou seja, a inclinação da Terra no movimento ao redor do Sol.

⁴⁶ [N.T.] Lorentz (1886, p. 112) discute o efeito do éter no movimento dos corpos que o atravessam, considerando o éter como um fluido incompressível, o que leva, de acordo com a hidrodinâmica, a considerar um potencial de velocidade em torno da terra, de acordo com a “camada” de fluido que a envolve. Essa variação da velocidade influencia na explicação da aberração estelar, usando a hipótese do éter de Stokes ou de Fresnel. A dedução de Lorentz é bem extensa e complexa e foge ao escopo deste trabalho.

⁴⁷ [N.T.] Essa especulação vem do fato de que a caixa de madeira que cobre o conjunto óptico afetaria o movimento do éter através dos braços. Sendo uma caixa de vidro, ou não usando a tampa, haveria um maior efeito do éter quando o conjunto rotacionasse.

Pode valer a pena mencionar outro método para multiplicar o quadrado da aberração suficientemente para trazê-lo dentro da faixa de observação, a qual se apresentou durante a [342] preparação deste trabalho. Isso é fundamentado no fato de que a reflexão em superfícies em movimento varia a partir das leis ordinárias da reflexão.

Seja ab (fig. 1 [Fig. 8]) uma onda plana incidindo sobre o espelho mn com [um ângulo de] incidência de 45° . Se o espelho estiver em repouso, a frente de onda após a reflexão será ac . Agora suponha o espelho em movimento em uma direção a qual forma um ângulo a com sua normal, com uma velocidade ω . Seja V a velocidade da luz no éter suposto estacionário, e seja cd o aumento na distância que a luz tem que viajar para alcançar d . Nesse momento o espelho terá se deslocado uma distância $\frac{cd}{\sqrt{2} \cos a}$. Temos $\frac{cd}{ad} = \frac{\omega \sqrt{2} \cos a}{V}$ o qual resulta $= r$, e $\frac{ac}{ad} = 1 - r$.

Com o objetivo de encontrar a nova frente de onda, desenha-se o arco fg com b como um centro e ad como um raio; a tangente para esse arco a partir de d será a nova frente de onda, e a normal à tangente traçada a partir de b será a nova direção. Esta vai diferir a partir da direção ba pelo ângulo θ o qual é necessário encontrar. A partir da igualdade dos triângulos adb e edb segue-se que $\theta = 2\varphi$, $ab = ac$,

$$\tan\left(45^\circ - \frac{\theta}{2}\right) = \frac{1 - \tan \frac{\theta}{2}}{1 + \tan \frac{\theta}{2}} = \frac{ac}{ad} = 1 - r,$$

ou negligenciando os termos de ordem r^3 ,

$$\theta = r + \frac{r^2}{2} = \frac{\sqrt{2\omega \cos a}}{V} + \frac{\omega^2}{V^2} \cos^2 a.$$

Agora, suponha que a luz incida sobre um espelho paralelo voltado para o primeiro, teríamos então $\theta_r = \frac{-\sqrt{2\omega \cos a}}{V} + \frac{\omega^2}{V^2} \cos^2 a$, e o desvio total seria $\theta + \theta_r = 2\rho^2 \cos^2 a$ em que ρ é o ângulo de aberração, se apenas o movimento orbital da Terra é considerado. O deslocamento máximo obtido ao girar todo o aparato através dos 90° seria $\Delta = 2\rho^2 = 0,0004''$. Com cinquenta desses pares o deslocamento seria de $0,2''$. Porém observações astronômicas em circunstâncias muito menos favoráveis do que aquelas em que essas podem ser tomadas, foram feitas para centésimos de segundo; assim este novo método promete ser tão sensível como o anterior.

A disposição do aparato pode ser como na fig. 2 [Fig. 8]; s no foco da lente a , é uma fenda; bb e cc são dois espelhos de vidro opticamente planos e prateados de modo a permitir dizer um-vigésimo de luz que passe através [deles], e refletindo cerca de noventa por cento. A intensidade da luz que incide no telescópio de observação df [344] seria cerca de um milionésimo da intensidade original, assim se a luz solar ou o arco elétrico fossem utilizados, ela ainda poderia ser prontamente observada. Os espelhos bb , e cc , poderiam diferir a partir do paralelismo, suficientemente para separar as imagens sucessivas. Finalmente, o aparato não precisaria ser montado de forma a girar, pois a rotação da Terra seria suficiente.

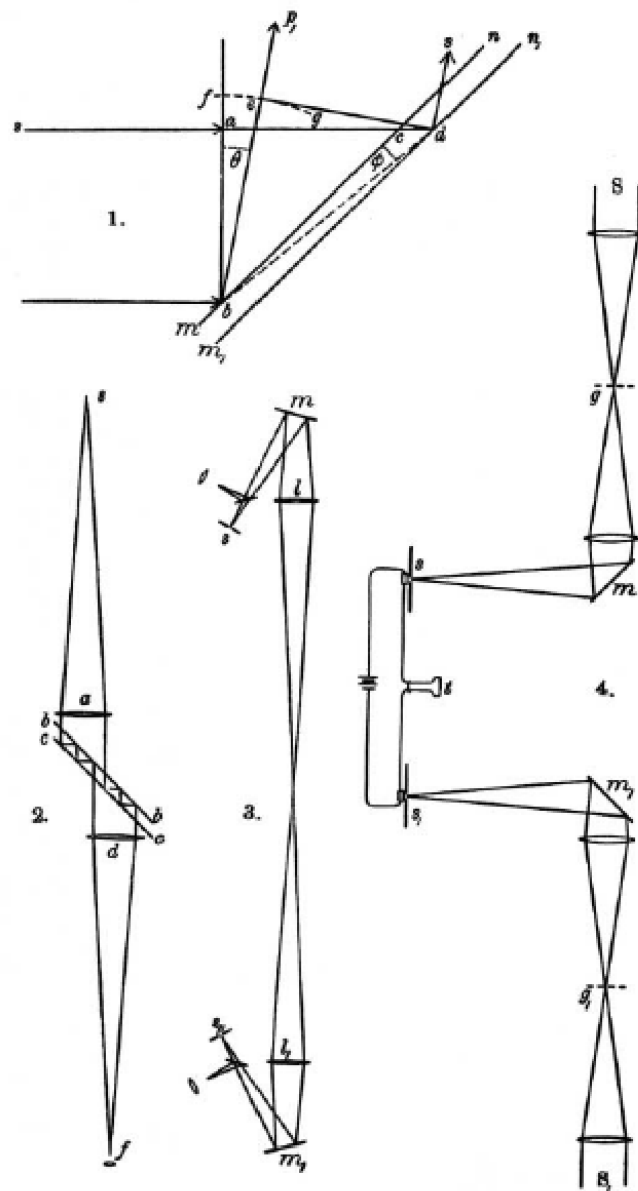


Fig. 8 – fig. 1⁴⁸. Fonte: Michelson; Morley, 1887, p. 343.

Se fosse possível medir com precisão suficiente a velocidade da luz sem retornar o raio ao seu ponto de partida, o problema de medir a primeira potência da velocidade relativa da Terra em relação ao éter poderia ser resolvido. Isso pode não ser tão irrealizável quanto poderia parecer à primeira vista, uma vez que as dificuldades são inteiramente mecânicas e podem possivelmente ser superadas no curso do tempo.

Por exemplo, suponha (fig. 3 [Fig. 8]) m e m' , dois espelhos girando com velocidade igual em direções opostas. É evidente que a luz proveniente de s formará uma imagem estacionária em s e similarmente a luz proveniente de s' formará uma imagem estacionária em

⁴⁸ [N.T] Conjunto de montagens que podem ser feitas para melhorar o resultado das interferências.

s. Se agora a velocidade dos espelhos for suficientemente aumentada, suas fases exatamente iguais, ambas as imagens serão desviadas a partir de s e s' , em proporção inversa para as velocidades da luz nas duas direções; ou, se as dois desvios forem feitos iguais, e a diferença de fase dos espelhos for simultaneamente medida, esta será evidentemente proporcional à diferença de velocidade nas duas direções. A única dificuldade real reside nessa medição. A seguir é talvez uma possível solução: *gg* (fig. 4 [Fig.8]) são duas grades nas quais a luz solar é concentrada. Estas são dispostas de modo que após [a luz] incidir sobre os espelhos giratórios m e m' , a luz forme imagens das grades em s e s' , duas células muito sensíveis de selênio num circuito com uma bateria e um telefone. Se tudo for simétrico [simetricamente ajustado], o som no telefone será máximo. Se agora uma das fendas s for deslocada pela metade da distância entre as imagens das barras da grade, haverá silêncio. Suponha agora que dois desvios tenham sido feitos exatamente iguais, a fenda seja ajustada para o silêncio. Caso então o experimento seja repetido quando a rotação da Terra tiver girado todo o aparato através dos 180° , e os desvios forem novamente feitos iguais, não haverá mais silêncio, e a distância angular através da qual s deverá ser movida para restaurar o silêncio medirá a diferença de fase requerida⁴⁹.

Restam ainda três outros métodos, todos astronômicos, para atacar o problema do movimento do sistema solar através do espaço.

1. A observação telescópica dos movimentos próprios das estrelas. Esta nos forneceu uma determinação altamente provável da direção desse movimento, mas apenas uma estimativa quanto à sua magnitude.
2. A observação espectroscópica do movimento das estrelas na linha de visão. Esta poderia fornecer dados apenas para os movimentos relativos, embora pareça provável que pelos imensos avanços na fotografia dos espectros estelares, as informações assim obtidas sejam muito mais precisas do que quaisquer outras.
3. Finalmente resta a determinação da velocidade da luz pelas observações dos eclipses dos satélites de Júpiter. Se os métodos fotométricos melhorados praticados no Observatório de Harvard tornarem possível observá-los com precisão suficiente, a diferença nos resultados encontrados para a velocidade da luz quando Júpiter⁵⁰ estiver mais próximo e mais distante a partir da linha de movimento fornecerá, não meramente o movimento do sistema solar com referências às estrelas, mas com referência para o próprio éter luminífero⁵¹.

⁴⁹ [N.T.] Michelson e Morley propõe a utilização de um circuito elétrico para identificar os máximos e mínimos da interferência da luz.

⁵⁰ [N.T.] Esta é a proposta teórica dada por Maxwell para tentar medir a influência do vento de éter sobre a velocidade da luz, conforme mencionado no início deste artigo.

⁵¹ [N. T.] Michelson e Morley terminam seu trabalho ainda considerando a ideia do éter. Eles não descartam a teoria ou provam que o éter não existe (Martins, 2015).

IV. Considerações gerais

Ao estudar essa fonte primária, realizando sua tradução e levando em consideração o contexto em que o trabalho foi produzido, é possível apreender várias informações científicas e sobre o fazer científico (Moura, 2019). Dentre as científicas, destacam-se a compreensão da aberração da luz e como ela influencia na medida do movimento relativo da Terra; estudos sobre referenciais e movimento dos corpos; estudos sobre interferometria considerando a luz como onda mecânica no éter; o papel do éter luminífero; além de outros conceitos não diretamente relacionados, como espectroscopia. Dentre os conhecimentos científicos, também podemos inserir os aparelhos, substâncias (mercúrio) e os equipamentos utilizados (espelhos, micrômetros, fonte luminosa, lentes, aparatos e suportes), cada um deles escolhido a partir de propriedades e características próprias úteis ao estudo fenomenológico.

Sobre o fazer científico, destaca-se a preocupação dos cientistas em cobrir o maior número possível de variáveis que poderiam influenciar nos resultados, e com precisão, o que demonstra não somente a necessidade de habilidades técnicas específicas, como também a condução do experimento a partir de teorias prévias. Observa-se a ênfase em aspectos quantitativos, representados por tabelas e gráficos, o que é mais característico da ciência produzida após a segunda metade do século XIX, nos ideais do positivismo. Por outro lado, a forma como Michelson e Morley planejam o experimento e as medidas que serão feitas serve como argumento para mostrar que o experimento não prova a teoria, mas é elaborado a partir dela, visando corroborar ou refutar hipóteses (Silveira; Peduzzi, 2006). Nesse caso, é a teoria (a hipótese do vento de éter de Maxwell) que determina cada escolha feita, como a angulação e rotação dos braços. O aspecto importante deste experimento é que ele é inconclusivo, como afirmam os autores no final. Após Michelson e Morley, os experimentos envolvendo o movimento da Terra no éter continuaram usando interferometria e outros métodos conforme pode ser aprofundado em Martins (2011; 2023).

Ainda, a tradução traz detalhes que permitem compreender como a prática científica é dinâmica e foi se estabelecendo de modo muito característico no final do século XIX e começo do século XX. Nesse sentido, destacam-se a profissionalização do cientista – o diferencial entre Morley e Michelson –, o financiamento de laboratórios de pesquisa e de periódicos especializados; a especialização do público que o periódico atinge, uma vez que o texto assume conhecimentos prévios sobre discussões científicas da época. Não é uma ciência de divulgação, não pretende atingir a todos; é um conhecimento especializado, restrito a quem está trabalhando com o tema.

Compreender a manipulação e equipamentos apenas pela leitura do texto é um dos desafios na tradução de uma fonte primária que envolve experimento. Por exemplo, como realizar a leitura e manipulação dos parafusos micrométricos se o conjunto ficava coberto por uma caixa de madeira? Além disso, os parafusos micrométricos deveriam exigir grande delicadeza na sua manipulação, e que não pode ser captada apenas pelo texto escrito. No relato de experimentos, conhecimentos tácitos e comuns para o cientista podem não ser revelados por

serem óbvios, e acabam dificultando a compreensão da fonte primária e a reprodução de resultados (Heering, 1992; Moura, 2019). Antes da tradução em si, foi necessário fazer um estudo aprofundado sobre os conhecimentos da época através de outras fontes primárias e secundárias, afim de entender os formalismos e maneiras de comunicação, hipóteses, descrições matemáticas, para que o artigo em questão pudesse ser melhor compreendido. Como mencionado, a fonte em questão não se trata de um texto de divulgação, mas aborda um conhecimento específico. Nesse caso, faz-se necessário entender primeiro a fonte primária para traduzi-la e conseguir discorrer sobre ela.

Neste estudo, utilizamos kits didáticos para ajudar a traduzir alguns dos movimentos e procedimentos necessários para a formação da figura de interferência; o ajuste dos espelhos e a sensibilidade das medidas. Portanto, de maneira inversa, podemos conjecturar que o estudo desta fonte primária pode trazer várias contribuições na formação de professores, quando associada a atividades experimentais demonstrativas ou investigativas, criando um cenário para a construção de hipóteses e contextualização do conhecimento.

Agradecimento

Agradecemos ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, cotas 2023-2024, 2024-2025 e 2025-2026. Este trabalho foi financiado com recursos do CNPq, processo 404373/2021-6 e desenvolvido no Laboratório Multiusuários da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

Referências bibliográficas

BEZERRA, L. H. S.; MOURA, B. A. Ciência, fé, conjectura e verdade para Galileu Galilei: um estudo crítico e contextualizado de fontes primárias. **Revista Ciências & Ideias**, ISSN: 2176-1477, p. e24152654-e24152654, 2024.

BUCHWALD, J. Z. **The rise of wave theory of light**: optical theory and experiment in the early nineteenth century. Chicago: University of Chicago, 1989.

CAMPOS, A. A.; ALVES, E. S.; SPEZIALI, N. L. **Física experimental básica na Universidade**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2008.

CANTOR, G. N. The historiography of ‘Georgian’ optics. **History of science**, v. 16, n. 1, p. 1-21, 1978.

CATELLI, F.; RAMOS, L. A. M. **Livro de atividades experimentais**: Física experimental, ondulatória, conjunto interferometria HeNe, EQ073B. Canoas: Cidepe, 2014.

CLARKE, F. W. Biographical Memoir Edward Williams Morley (1838-1923). **National Academy of Sciences**. V. XXI, 1924.

CORDEIRO, M. D. Ciência e Valores: uma leitura epistemologicamente guiada de fontes primárias. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, n. 3, p. 1130-1155, 2021.

DARRIGOL, O. **A history of optics: from Greek Antiquity to the Nineteenth Century**. Oxford: Oxford University Press, 2012.

DIAS, V. S.; MARTINS, R. A. Michael Faraday: o caminho da livraria à descoberta da indução eletromagnética. **Ciência & Educação**, v. 10, n. 3, p. 517-530, 2004.

FIZEAU, A. H. L. Sur les hypothèses relatives a l'éther lumineux. **Annales de chimie et de physique**. Paris: Imprimerie de Mallet-Bachelier, v. LVII, p. 385-404, 1859.

FLECK, L. To look, to see, to know [1947]. In: **Cognition and Fact: Materials on Ludwik Fleck**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1986. p. 129-151.

FRERCKS, J. Fizeau's Research Program on Ether Drag: A Long Quest for a Publishable Experiment. **Physics in perspective**. 7, p. 35-65, 2005.
<https://doi.org/10.1007/s00016-004-0224-0>

HAMERLA, R. R. **An American scientist on the research frontier: Edward Morley, community, and radical ideas in nineteenth-century science**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2006.

HEERING, P. On Coulomb's inverse law. **American Journal of Physics**, n. 60, p. 988-994, 1992. Doi: 10.1119/1.17002

KARAM, R. Considerações metodológicas sobre o uso de fontes primárias no ensino de Física. **Revista Brasileira de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 4, n. 3, p. 1067-1082, 2021.

LORENTZ, H. A. Versuch einer Theorie der elektrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern. In: SARAIVA, M. J. **Textos Fundamentais da Física Moderna**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2014. p. 5-11.

LORENTZ, H. A. De L'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux. **Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles**, Tomo XXI, p. 103-176, 1886.

MAGIE, W. F. **A source book in Physics**. Cambridge: Harvard University Press, 1935.

MARTINS, L. A-C. P. História da ciência: objetos, métodos e problemas. **Ciência & Educação**, v. 11, n. 2, p. 305-317, 2005.

MARTINS, R. A. A dinâmica relativística antes de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 11-26, 2005.

MARTINS, R. A. Searching for the ether: Leopold Courvoisier's attempts to measure the absolute velocity of the solar system. **Dio: The International Journal of Scientific History**, v. 17, p. 3-33, 2011.

MARTINS, R. A. O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818-1880). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 52-80, 2012.

MARTINS, R. A. **A origem histórica da relatividade especial**. Editora Livraria da Física, 2015.

MARTINS, R. A. Em busca do éter: de Maxwell a Michelson, Morley e Miller. **Ensaio sobre História e Filosofia da Ciências III**. Extrema: Quamcumque Editum, 2023.

MERRIMAN, O. **Gas burners old and new. A historical and descriptive treatise on the progress of invention in gas lighting; embracing an account of the theory of luminous combustion**. London: W. King and Sell, 1884. Disponível em: <https://www.gutenberg.org/cache/epub/37928/pg37928-images.html>. Acesso em: 8 out. 2025.

MICHELSON, A. A. ART. XXI. The relative motion of the Earth and the Luminiferous ether. **American Journal of Science (1880-1910)**, v. 22, n. 128, p. 120, 1881.

MICHELSON, A. A.; MORLEY, E. W. Influence of motion of the medium on the velocity of light. **American journal of science**, v. 3, n. 185, p. 377-385, 1886.

MICHELSON, A. A.; MORLEY, E. W. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. **American Journal of Science**, v. 3, n. 203, p. 333-345, 1887.

MOURA, B. A. Leitura Contextualizada de Fontes Primárias: Subsídios para Incluir a História das Ciências em Situações de Ensino. In: SILVA, A. P. B., MOURA, B. A. (Eds.) **Objetivos humanísticos, conteúdos científicos**: contribuições da história e da filosofia da Ciência para o ensino de Ciências [online]. Campina Grande: EDUEPB, 2019, p. 317-355. ISBN: 978-85-78795-79-5. <http://doi.org/10.7476/9786586221664.0011>.

PIFER, A. *et al.* Kirchhoff e os primórdios da espectroscopia: contextualização e tradução comentada de seu artigo de 1859 sobre o problema das Linhas de Fraunhofer. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 47, p. e20250131, 2025.

PIMENTEL Jr., R. A. **Uma História da Interferometria no Século XIX**. 2012. 397 f. Tese (doutorado) – Programa de Pós-graduação em História das Ciências e das Técnicas e Epistemologia, UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

PINSKY, C. B (org.) **Fontes históricas**. 3. ed. São Paulo: Contexto, 2019.

PINTO, J. A. F. **Discutindo a construção de repertórios didáticos em uma perspectiva histórico-investigativa**: condicionantes para a prática na formação inicial de professores de Física. 2022. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-25042022-172259/>. Acesso em: 22 out. 2025.

RABENO, Y. B.; LIMA, N. O Princípio de Mínima Ação de Maupertuis: O que futuros professores de Física podem aprender estudando uma fonte primária? **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, p. 575-609, 2023.

SIBUM, H. O. What kind of science is experimental physics? **Science**, v. 306, n. 5693, p. 60-61, 2004.

SILVA, A. P. B.; SILVA, T. C. Medidas do movimento relativo da Terra no século XIX: Um estudo do interferômetro de Fizeau. **A Física na Escola**, v. 23, p. e240243-e240243, 2025.

SILVEIRA, F. L.; PEDUZZI, L. O. Q. Três episódios de descoberta científica: da caricatura empirista a uma outra história. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. v. 23, n. 1, p. 27-55, 2006.

SHANKLAND, R. S. A. A. Michelson, 1852-1931. **Nature**, v. 171, n. 4342, p. 101-103, 1953.

STOKES, G. G. II. On the Constitution of the luminiferous Æther, viewed with reference to the phenomenon of the aberration of light. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 29, n. 191, p. 6-10, 1846.

WHITTAKER, E. T. A history of the theories of aether and electricity. 2 v. American Institute of Physics: Tomash Publishers, 1987.



Direito autoral e licença de uso: Este artigo está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#).