"O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra (1818-1880)"

Roberto de Andrade Martins
Grupo de História e Teoria da Ciência, Unicamp

1 RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar os experimentos propostos e/ou realizados durante o século XIX (porém antes dos experimentos de Michelson e Morley) para procurar detectar o movimento da Terra em relação ao éter, relacionado-os ao desenvolvimento dos conceitos físicos e teorias defendidas no período, dando especial ênfase à teoria do éter de Augustin Fresnel.

2 INTRODUÇÃO

O conteúdo empírico de um dos princípios básicos da teoria da relatividade especial ou restrita (o postulado da relatividade) exprime a impossibilidade de detectar o movimento de translação de um sistema físico a partir de experimentos feitos dentro do próprio sistema. Apenas se pode medir o movimento de um sistema físico em relação a um outro, e apenas a velocidade *relativa* de ambos pode ser determinada experimentalmente.

Costuma-se citar o experimento de Michelson e Morley como o fundamento experimental do postulado da relatividade. Sabe-se que Michelson, em 1881, e depois Michelson e Morley, em 1887, tentaram medir a velocidade da Terra através do éter, utilizando um interferômetro óptico, e não obtiveram o resultado previsto[1]. Poucos anos depois, Henri Poincaré propôs o princípio da relatividade, que foi mais tarde adotado também por Albert Einstein[2].

Porém, a história é muito mais complicada do que a versão popular indica. Tanto antes quanto depois dos experimentos de Michelson e Morley, houve muitas outras tentativas de medir a velocidade da Terra através do éter; e tanto antes quanto depois, houve pesquisadores que afirmaram haver encontrado resultados positivos, e outros que disseram não ter encontrado efeitos do movimento da Terra[3].

Não se pode entender de forma adequada o significado do surgimento da teoria da relatividade sem uma compreensão do verdadeiro contexto histórico que precedeu essa teoria. E esses precedentes incluem um período no qual havia teorias sobre o éter muito bem estruturadas sob o ponto de vista teórico, e bem fundamentadas sob o ponto de vista experimental[4].

Havia, no final do século XIX, dois campos da física que estavam estruturados sobre o conceito de éter: o eletromagnetismo e a óptica, que haviam sido unificados pela teoria de James Clerk Maxwell[5]. Tanto a história do eletromagnetismo quanto o da óptica durante o século XIX são essenciais para a compreensão do surgimento da teoria da relatividade. No entanto, é

---

[1] R. S. Shankland, "Michelson-Morley Experiment", pp. 16-35.

[2] C. Scribner Jr., "Henri Poincaré and the Principle of Relativity", pp. 672-678; E. Giannetto, "The Rise of Special Relativity: Henri Poincaré's Works before Einstein", pp. 171-207.

[3] R. de A. Martins, "A Popperian Evaluation of Einstein's Theory-plus-Method", pp. 95-124; Lloyd S. Swenson, *The ethereal aether – a history of the Michelson-Morley-Miller aether drift experiments, 1880 -1930.*

[4] John Worrall comentou sobre o impressionante sucesso da teoria do éter de Fresnel em prever fenômenos que foram depois confirmados experimentalmente. Ver: J. Worrall, "How to remain (reasonably) optimistic: Scientific realism and the *luminiferous ether*", pp. 334-342.

[5] Além dos fenômenos ópticos, o éter também explicava a ocorrência de forças à distância, como a elétrica e a gravitacional , desde o século XVII. Não iremos abordar tais questões no presente trabalho e uma discussão a esse respeito pode ser encontrada em E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*; e R. Martins, "Descartes e a Impossibilidade de Ações à Distância" *in* S. Fuks, ed. *Descartes 400 anos. Um legado Científico e Filosófico*, pp. 79-126.

inviável procurar abordar ambos em uma única tese[6]. Considerando a existência de bons estudos recentes sobre os precedentes eletromagnéticos da relatividade[7], o presente projeto procurará dar uma contribuição ao esclarecimento de alguns aspectos da óptica dos corpos em movimento, antes dos experimentos de Michelson e Morley[8].

3 HISTÓRICO DA QUESTÃO

Desde a Idade Média, de diferentes formas, existiu a preocupação em saber se seria possível decidir através da experiência se a Terra se move ou não. Dentre os muitos movimentos a favor ou contra o movimento da Terra, alguns estavam desde aquela época associados à óptica. Nicole Oresme, ao discutir a questão, utilizou um argumento de Witelo, segundo o qual um observador que vê movimentos a partir de um navio não pode saber se é o navio ou os outros objetos que estão em movimento. Para defender a possibilidade de que a Terra estivesse em movimento, Galileo Galilei afirmou que não apenas os fenômenos mecânicos, mas também os fenômenos ópticos em um navio em movimento são idênticos aos fenômenos correspondentes em um navio parado[9].

3.1 O fenômeno de aberração da luz

Se a Terra se move em torno do Sol (como defendiam os copernicanos), deveriam surgir efeitos visíveis desse movimento, como a paralaxe estelar: em diferentes épocas do ano, as estrelas estariam sendo vistas a partir de diferentes posições da Terra em sua órbita, e isso deveria produzir variações angulares em suas posições[10]. Já em 1573, Thomas Digges havia apontado a importância de testar essa conseqüência, e diversos observadores acreditaram depois que haviam encontrado paralaxes estelares – mas Tycho Brahe e G. B. Riccioli negaram a existência do efeito. Em 1680, depois de observações que duraram 10 anos, Jean Picard afirmou ter medido variações anuais de 40" da posição da estrela polar, mas as mudanças de posição eram perpendiculares às direções em que deveriam ocorrer, se fossem devidas à paralaxe. Outros observadores que detectaram movimentos aparentes das posições das estrelas ao longo do ano semelhantes a essas foram Robert Hooke (em 1674) e James Flamsteed (em 1689). A interpretação do efeito medido não era clara.

Em 1725, James Bradley (1692-1762) e Samuel Molyneux começaram a se dedicar à questão da paralaxe estelar, com a intenção de resolver se ela existia ou não[11]. Após vários meses de observação, mediram variações da posição de uma estrela, mas a direção dessa variação – como nos casos anteriormente citados – não era a esperada. Em 1727 Bradley encontrou uma explicação adequada para o fenômeno observado. Era um efeito devido ao movimento da Terra, mas que não correspondia à simples mudança de *posição* do observador: era um efeito devido à *velocidade* da Terra, que foi denominado "aberração"[12]. É possível entender o fenômeno por uma analogia. Suponhamos que, em um lugar, a chuva esteja caindo verticalmente. Se uma

---

[6] E. T. Whittaker, no primeiro volume de sua obra *A history of the theories of aether and electricity*, procurou abordar todos esses aspectos. Como se poderia esperar, não conseguiu desenvolver um estudo suficientemente profundo e historicamente bem fundamentado, pela excessiva amplitude do seu objeto.

[7] Ver, por exemplo, o artigo de O. Darrigol, "The electrodynamic origins of relativity theory", pp. 241-312, e outros trabalhos lá citados. Veja-se também esta tese recente: M. Janssen, *A Comparison between Lorentz's Ether Theory and Special Relativity in the Light of the Experiments of Trouton and Noble*.

[8] É evidente que há estudos anteriores sobre as teorias de éter nesse período, como por exemplo: T. Hirosige, "The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity", pp. 3 –82, mas que não discutem de forma suficientemente profunda e detalhada o tema aqui abordado.

[9] R. A. Martins, "Galileo e o Princípio da Relatividade", pp. 69-86.

[10] A. B. Stewart, "The Discovery of Stellar Aberration", pp. 100-107.

[11] *Ibid.*

[12] K. M. Pedersen, "Roger Joseph Boscovich and John Robinson on Terrestrial Aberration", p. 336.

pessoa estiver parada, segurando na posição vertical um tubo aberto nas duas extremidades, as gotas de chuva poderão atravessar o tubo sem tocar em suas paredes. Mas se a pessoa estiver se movendo horizontalmente, as gotas já não atravessarão o tubo, colidindo dentro dele com suas paredes. Para que as gotas passem pelo tubo, ele agora precisará ficar em uma posição *inclinada* em relação à vertical.

No caso da aberração estelar, a luz que chega à Terra vinda de uma estrela corresponde à chuva, e o telescópio corresponde ao tubo. Supondo que o movimento do tubo é perpendicular à direção onde está a estrela, ela só será vista se o telescópio estiver inclinado, apontando em uma direção diferente, como mostrado na figura, com um desvio angular $\alpha \cong tan\ \alpha = v/c$, onde v é a velocidade da Terra, e c é a velocidade da luz[13].

Se a Terra se movesse com velocidade constante, esse efeito nunca poderia ser observado, pois sabemos apenas a posição *aparente* das estrelas. O efeito de aberração era mensurável porque a velocidade da Terra varia, e comparando-se as posições de uma mesma estrela em diferentes meses, percebia-se a diferença de posição.

As medidas e a interpretação de Bradley foram aceitas rapidamente. Embora não fosse explícito, o argumento utilizado por Bradley supunha que a luz se comportava como um conjunto de partículas.

Durante o século XVIII, a interpretação corpuscular da luz era aceita por quase todos, mas houve uma importante defesa da teoria ondulatória da luz por Leonhard Euler (1707-1783)[14], que publicou um livro sobre o tema em 1746. Entre outros resultados, Euler mostrou que a teoria ondulatória da luz também permitia explicar o fenômeno de aberração da luz das estrelas.

3.2 O telescópio cheio de água

O desvio angular sofrido pela luz devido ao movimento da Terra (ou ângulo de aberração) depende, como indicado acima, da velocidade da luz e da velocidade da Terra. Mas, em 1753 Thomas Melvill questiona: a aberração estelar depende de v/c, mas c é a velocidade da luz no espaço vazio, ou na atmosfera, ou no olho do observador?[15] A velocidade da luz no espaço entre as estrelas e a Terra é c, e na atmosfera terrestre é um pouco menor do que c (por causa da refração pelo ar), mas a diferença é pouco significativa. Suponhamos, no entanto, que o telescópio estivesse cheio de água. Na água, a velocidade da luz é muito diferente de c, pois o índice de refração n da água é aproximadamente 4/3, ou seja, muito diferente de 1. Haveria então um efeito de aberração diferente, com o telescópio cheio de água? Essa foi a pergunta que vários pesquisadores fizeram, no final do século XVIII[16].

---

[13] Um efeito correspondente também existe se o telescópio estiver imóvel e a fonte luminosa estiver se movimentando. A aberração só depende da existência de um movimento *relativo*.

[14] R. W. Home, "Leonhard Euler's 'anti-Newtonian' theory of light", pp. 521-533; F. Giudice, "La tradizione del mezzo e la Nuova teoria della luce di Leonhard Euler", pp.3-49; C. Hakfoort, *Optics in the age of Euler: conceptions of the nature of light, 1700-1795*.

[15] K. M. Pedersen, "Roger Joseph Boscovich and John Robinson on Terrestrial Aberration", p. 336, e do mesmo autor: "Water-Filled Telescopes and the Pre-History of Fresnel's Ether Dragging", pp. 504-512.

[16] K. M. Pedersen, "Water-Filled Telescopes and the Pre-History of Fresnel's Ether Dragging", pp. 499-564.

O primeiro a propor tal experiência foi Roger G. Boscovich (1711-1787) em 1766, prevendo teoricamente um *acréscimo* na aberração, se fosse assumida a hipótese corpuscular para a refração, e um *decréscimo* para o caso de valerem as concepções de Huygens. Entretanto, Boscovich nunca realizou esses experimentos.

A questão era interessante, sob três pontos de vista. Primeiramente, porque o valor da velocidade da luz dentro da água nunca havia sido medido, e esse valor seria *maior do que c* (*nc*) de acordo com a teoria corpuscular, e *menor do que c* (*c/n*) de acordo com a teoria ondulatória da luz. Talvez o estudo da aberração da luz em um telescópio cheio de água pudesse determinar qual a teoria correta[17].

Em segundo lugar, se a aberração em um telescópio com água fosse diferente da aberração em um telescópio cheio de ar, a comparação entre os dois ângulos permitiria determinar a velocidade da Terra em um dia qualquer, sem ser necessário comparar medidas obtidas ao longo de vários meses.

Um terceiro ponto tornava a questão ainda mais curiosa. Talvez fosse possível medir um efeito de aberração utilizando uma fonte de luz terrestre, comparando a posição de uma fonte luminosa distante observada com dois telescópios – um deles cheio de água, e o outro cheio de ar[18]. Se fosse possível medira a *aberração terrestre*, o fenômeno violaria o princípio da relatividade, permitindo determinar a velocidade de translação da Terra por medidas feitas na própria Terra, sem observar nada externo a ela.

No caso da teoria corpuscular da luz, a aberração terrestre não poderia existir, já que os fenômenos mecânicos obedecem ao princípio de relatividade, e a luz seria (de acordo com essa hipótese) um fluxo de partículas de alta velocidade que obedeceriam às leis da mecânica. No caso da teoria ondulatória, a situação era completamente diferente, pois nesse caso a luz seria uma vibração que se propaga em um determinado meio que preenche o espaço – o éter – e nada impedia, *a priori*, que se concebesse a possibilidade de medir a velocidade da Terra em relação a esse éter.

As idéias lançadas por Boscovich, pareciam iluminar o debate entre as teorias corpuscular e ondulatória da luz, e em 1790, John Robinson (1739-1805) propôs um experimento para testar qual teoria seria válida[19]. Todavia, o experimento não pôde ser realizado na época, pois tais telescópios eram de difícil construção e manuseio[20].

3.3 A teoria ondulatória da luz no início do século XIX

Até o final do século XVIII, a maioria dos físicos aceitava a teoria corpuscular da luz e a teoria ondulatória era considerada mais como uma curiosidade do que como uma alternativa de peso. Isto não significa que não havia defensores da teoria ondulatória, mas a teoria corpuscular parecia ocupar um lugar preponderante nas explicações dos fenômenos ópticos. A situação mudou nas duas primeiras décadas do século XIX, quando o estudo de diversos fenômenos foi reforçando rapidamente a idéia de que a luz seria uma onda[21].

---

[17] Essa questão foi decidida (a favor da teoria ondulatória) em 1850, por Léon Foucault, que mediu através de experimentos terrestres a velocidade da luz no ar e na água. Ver: W. Tobin, "Toothed wheels and rotating mirrors: Parisian astronomy and mid-nineteenth century experimental measurements of the speed of light", pp. 253-294.

[18] Pedersen, "Roger Joseph Boscovich and John Robinson on Terrestrial Aberration" pp. 336-40.

[19] J. Robinson, "On the Motion of Light, as affected by refracting and reflecting Substances, which are also in Motion", pp. 83 - 111.

[20] A descrição da experiência, as dificuldades encontradas e os novos desdobramentos podem ser encontrados em Pedersen, "Water-Filled Telescopes and the Pre-History of Fresnel's Ether Dragging", pp. 522 – 533, ou ainda do mesmo autor: "Roger Joseph Boscovich and John Robinson on Terrestrial Aberration", pp. 337-44.

[21] Uma descrição detalhada é apresentada neste livro: J. Z. Buchwald, *The Rise of the Wave Theory of Light. Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*.

Os experimentos de Ètienne Louis Malus (1775-1812) e David Brewster (1781-1868) sobre o fenômeno da polarização contribuíram para esse quadro[22]. No entanto, os resultados mais importantes parecem ter sido os proporcionados pelos experimentos sobre interferência e difração, realizados por Thomas Young (1773-1829) e Augustin Jean Fresnel (1788-1827), e sua interpretação[23]. Esse episódio da história da óptica já foi muito estudado e é bem conhecido. Não será, por isso, descrito aqui.

3.4 O experimento de Arago e a teoria de Fresnel

Em 1809, François Jean Dominique Arago (1786-1853) realizou um experimento no qual procurou observar um efeito do movimento da Terra sobre a luz, medindo a deflexão que a luz das estrelas sofria ao passar por um prisma. Arago se baseou em diversos pressupostos. Considerou que a velocidade da luz dentro do prisma de vidro seria sempre a mesma, independentemente do movimento da Terra; mas que, fora do prisma, a velocidade da luz seria maior se a Terra estivesse se aproximando de uma estrela, e menor se a Terra estivesse se afastando da estrela. Como o desvio da luz ao penetrar em um meio transparente depende da variação de velocidade que ela sofre ao passar de um meio para outro, Arago imaginou que o desvio da luz pelo prisma poderia depender, portanto, do movimento da Terra em relação às estrelas. Tal efeito, se existisse, não violaria o princípio da relatividade, mas permitiria medir a velocidade da Terra em relação às estrelas. No entanto, ao realizar o experimento, o resultado previsto não foi observado[24].

A análise do experimento de Arago pressupunha a validade da teoria de Newton (corpuscular) para a luz. Porém, alguns anos mais tarde, a situação estava diferente. Na França, a Academia de Ciências havia proposto em 1817 um prêmio para o melhor trabalho sobre o fenômeno da difração. Faziam parte da comissão julgadora Laplace, Poisson e Biot, todos defensores da teoria corpuscular, mas o trabalho de Fresnel defendendo a teoria ondulatória teve um tal impacto que todos decidiram conceder-lhe o prêmio, em 1818[25]. Nessa época, Arago era o presidente da Academia de Ciências. Ele resolveu consultar Fresnel a respeito do seu antigo experimento, perguntando-lhe se seria possível explicar o efeito nulo obtido, utilizando a teoria ondulatória. Fresnel apresentou uma resposta positiva em um artigo, sob a forma de uma carta dirigida a Arago, que foi publicada em 1818 na revista *Annales de Chimie et de Physique*, da qual o próprio Arago era um dos editores[26].

Mais do que explicar o experimento de Arago, o artigo de Fresnel desenvolveu uma teoria detalhada da relação entre os corpos transparentes e o éter luminífero, lançando as bases para uma óptica dos corpos em movimento[27].

3.5 O arrastamento do éter pelos corpos transparentes

Fresnel supôs que o éter preenche todos os espaços aparentemente vazios do universo, e que nessas regiões ele está em repouso. Ele geralmente não seria movido pelos corpos que se deslocam através dele, como a Terra. Nas regiões sem matéria, a luz se propagaria sob a forma

---

[22] X. Chen, "The debate on the "polarity of light" during the optical revolution", pp. 359-393.

[23] J. Worrall, "Thomas Young and the "refutation" of Newtonian optics: A case-study in the interaction of philosophy of science and history of science", pp. 107-179; S. Ganci, "Le teorie della diffrazione di T. Young e di A. Fresnel", pp. 199-206.

[24] O trabalho só foi publicado muito depois: F. Arago, "Mémoire sur la vitesse de la Lumière, lu à la première Classe de l'Institut, le 10 décembre 1810", pp. 38–49.

[25] Arago em 1814 já havia tomado conhecimento do trabalho de Fresnel a respeito da difração, embora o período de 1814 até a época do prêmio em 1818 tenha sido de grande produção. Ver a respeito em T. Levitt, "Editing out caloric: Fresnel, Arago and the meaning of Light", p. 54.

[26] A. Fresnel, "Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique", pp. 57–66.

[27] A. Mayrargue, "Fresnel and optical ether", pp. 234-237.

de ondas nesse éter parado. No entanto, deveria haver algum tipo de interação entre o éter e os corpos transparentes. De fato, se a luz é uma onda do éter, e se a velocidade da luz é menor dentro dos corpos transparentes (como admitido pelos defensores da teoria ondulatória), então o éter dentro dos corpos transparentes não pode ter as mesmas propriedades que possui fora deles. Por analogia com o som, a velocidade da luz no éter deveria depender da pressão e da densidade desse meio, sendo a luz mais lenta nas regiões onde a pressão fosse menor, ou a densidade fosse maior. Fresnel supôs que era a densidade do éter que variava, e que ele seria mais denso dentro dos corpos transparentes. Ainda de acordo com a analogia, a densidade D do éter dentro de um meio transparente com índice de refração n seria n^2 vezes maior do que a sua densidade D_0 numa região sem matéria. Portanto, o éter atravessaria a matéria, mas uma parte dele seria arrastada pelos meios transparentes deixando uma densidade maior de éter em seu interior.

Pensemos em um pedaço de vidro se movendo através do éter. Fora dele, a densidade do éter é D_0, e dentro dele a densidade é $D=n^2D_0$. O excesso de densidade do éter dentro do vidro é, portanto, $D-D_0=(n^2-1)D_0$, e esse excesso de densidade deve se mover junto com o vidro. De todo o éter que está dentro do vidro, apenas uma parcela k igual a:

$$\mathrm{k} = \frac{D - D_0}{D} = \frac{\left(n^2 - 1\right) D_0}{n^2 D_0} = 1 - \frac{1}{n^2}$$

É essa fração do éter que seria transportada pelo vidro quando ele se deslocasse pelo éter. Esse fator $k=(1-1/n^2)$ é chamado de *coeficiente de arrastamento do éter*.

Utilizando essas idéias, Fresnel analisou o que aconteceria com a velocidade da luz quando ela estivesse se propagando dentro de um meio transparente em movimento, com velocidade w em relação ao éter. Se o meio transparente está em repouso, a velocidade é simplesmente $v'=c/n$. Mas o que ocorre quando o objeto transparente se move?

Se o éter fosse totalmente arrastado pelo corpo transparente, poderíamos fazer uma simples soma de velocidades, e teríamos uma velocidade igual a $v''=c/n+w$. No entanto, como o objeto transparente não arrasta totalmente o éter, Fresnel concluiu que a velocidade da luz dentro do corpo transparente em movimento, medida por um observador parado em relação ao éter, seria:

$$\mathrm{v} = \frac{c}{n} + kw = \frac{c}{n} + \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) w$$

Note-se que a teoria de Fresnel é complexa e quantitativa, não se limitando a simples especulações sobre o éter.

Utilizando sua teoria, Fresnel analisou então tanto a proposta de experimento do telescópio cheio de água, quanto o experimento de Arago, e mostrou que nos dois casos existem diversos efeitos que se anulam, e que em ambas as situações não é possível medir nenhum efeito do movimento da Terra através do éter.

3.6 O experimento de Babinet

Experimentos como o do telescópio cheio de água e o de Arago, se detectassem algum efeito, mostrariam influências proporcionais à primeira potência da velocidade da Terra através do éter – ou seja, *efeitos de primeira ordem*[28]. A velocidade orbital da Terra é cerca de 10.000 vezes menor do que a velocidade da luz no espaço sem matéria, e esses efeitos de primeira ordem são da ordem de v/c = 0,0001 = 10^{-4}. Seriam efeitos pequenos, mas mensuráveis sem grande dificuldade técnica.

Em 1839, Jacques Babinet (1794-1872) realizou um novo experimento de primeira ordem, comparando através de um método interferométrico as velocidades da luz dentro de um bloco de vidro[29], nos casos em que a luz se move no sentido do movimento da Terra, e no sentido oposto.

[28] R. Mansouri & R. U. Sexl, "Test theory of special relativity. 2. 1st order tests", pp. 515-524.
[29] J. Babinet, "Sur l'Abérration de la Lumière", pp. 774 - 775.

A análise quantitativa do fenômeno, utilizando a teoria ondulatória da luz, parecia indicar que deveria surgir um efeito mensurável proporcional à velocidade da Terra. No entanto, nenhum efeito foi observado. Embora Babinet não tenha aplicado a teoria de Fresnel ao seu experimento, é possível provar que, levando-se em conta o arrastamento parcial do éter pelo vidro, prevê-se um efeito nulo desse experimento.

3.7 O éter viscoso de Stokes

A despeito do sucesso que a teoria de Fresnel obteve em explicar o resultado de alguns experimentos, essa teoria era extremamente complexa, e na década de 1840 persistiam alguns problemas com relação à velocidade de propagação da luz em diferentes meios. George Gabriel Stokes (1819-1903) propôs, em 1845, uma nova teoria do éter, mais simples do que a de Fresnel em vários aspectos.

A teoria de Stokes propunha que o éter seria como um material viscoso, que aderia à superfície dos corpos, sendo quase totalmente arrastado pela Terra, ficando em repouso em relação a ela na região próxima ao solo[30]. Tal arrastamento faz com que qualquer experimento óptico puramente terrestre independa do movimento da Terra, o que explica o resultado nulo dos experimentos de Boscovich, Arago e Babinet.

Por quê ninguém havia pensado nisso antes? Porque anteriormente se imaginava que qualquer teoria na qual o éter fosse arrastado pela Terra seria incapaz de explicar a aberração estelar. O raciocínio utilizado (errôneo) era de que, se a Terra arrastasse o éter em sua proximidade, todos os fenômenos ópticos próximos à Terra (incluindo o funcionamento do telescópio) se comportariam como se não houvesse nenhum movimento, e portanto não poderia ser observada a aberração. No entanto, Stokes mostrou que era possível explicar a aberração estelar, em sua teoria, mostrando que haveria uma gradual mudança de direção da luz à medida que ela atravessasse as sucessivas camadas de éter com diferentes velocidades. Assim, ele conseguiu mostrar que sua teoria era compatível com todos os fenômenos conhecidos[31].

Embora tivesse proposto sua nova visão a respeito do éter, o próprio Stokes mostrou que a teoria de Fresnel era de grande valor. Além de explicar o experimento de Arago e prever um efeito nulo para o telescópio com água, a teoria do arrastamento parcial do éter podia explicar o experimento de interferência de Babinet, como foi mostrado por Stokes. Neste, como nos outros casos, a análise quantitativa é complexa, e envolve o cancelamento de vários efeitos diferentes. Em 1846, Stokes proporia a seguinte generalização para esses resultados: "Embora a Terra se mova através do éter e a luz seja transmitida pelo éter, os fenômenos ópticos, reflexão, refração e propagação retilínea, não permitem detectar esse movimento"[32].

3.8 Fizeau e a confirmação de Fresnel

Em 1850, Jean-Bernard-Leon Foucault (1819-1869) e Armand-Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) fizeram as primeiras medidas terrestres da velocidade da luz, através de métodos diferentes, que deram resultados concordantes. No mesmo ano, Foucault conseguiu medir a velocidade da luz na água e mostrar que ela era menor do que no ar, confirmando assim a previsão da teoria ondulatória da luz[33].

---

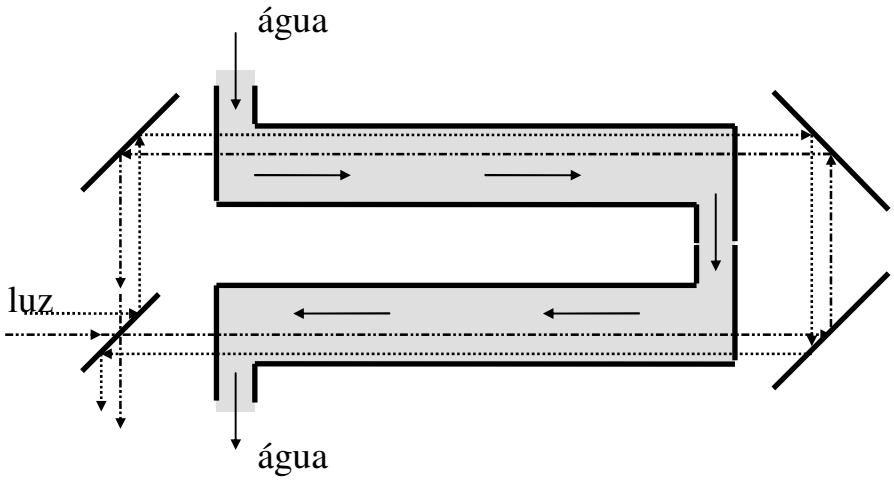
[30] M. Janssen & J. Stachel, "The Optics and Electrodynamics of Moving Bodies", em S. Petruccioli et al., eds., *Storia della Scienza*. Disponível em: <http://www.tc.umn.edu/~janss011/pdf files/ether.pdf>, acessado em 12/11/2003.

[31] G. G. Stokes, *Mathematical and Physical Papers*. Veja a respeito também em D. B. Wilson, "G. G. Stokes on stellar aberration and luminiferous ether", pp. 57-72; L. S. Swenson, *The Ethereal Aether –A History of the Michelson-Morley-Miller Aetherdrift Experiments, 1880-1930*, pp. 23-4.

[32] G. G. Stokes, "On Fresnel's theory of the aberration of light", *in: Mathematical and physics papers*, pp. 142–47.

[33] Ver Tobin, *loc. cit.*

Em 1851, Fizeau realizou (com o auxílio de Foucault[34]) um novo experimento, com o objetivo de testar a teoria de Fresnel[35]. A idéia era procurar medir o efeito do arrastamento da luz por um meio transparente em movimento. O esquema abaixo representa o experimento:



Uma corrente de água percorre um tubo em U, cujas extremidades são fechadas por vidro, de tal modo a permitir a passagem de luz por dentro da água. Um feixe inicial, monocromático, é dividido antes de entrar no aparelho e cada uma das suas metades percorre o mesmo caminho dentro da água, porém em sentidos opostos. Como um dos feixes caminha no mesmo sentido que a água, ele deveria ter uma maior velocidade do que se estivesse parado, segundo a teoria de Fresnel; e o outro teria uma velocidade menor.

Primeiramente, observava-se a interferência entre os dois feixes com a água parada, depois a água era colocada em movimento, e se procurava observar um deslocamento das franjas de interferência. Se a teoria de Fresnel estivesse correta, haveria um deslocamento que podia ser calculado. Se ela estivesse errada, não deveria ocorrer o efeito.

O resultado confirmou a previsão teórica, mostrando um efeito que foi interpretado como devido ao arrastamento parcial do éter pela água. A experiência realizada com ar apresentou também um resultado compatível com a teoria, ou seja: não se percebeu nenhum efeito, porque o arrastamento era muito pequeno. Portanto, o experimento de Fizeau de 1851 trouxe uma importante contribuição: uma forte confirmação da teoria de Fresnel[36].

3.9 A detecção do movimento da Terra em relação ao éter

Já que o éter parecia existir e se comportar de acordo com a teoria de Fresnel, Fizeau se dedicou a tentar encontrar outros experimentos que pudessem medir efeitos da velocidade da Terra em relação ao éter[37]. Em 1859 publicou os resultados de uma de suas tentativas, na qual afirmou ter obtido resultados *positivos*[38]. O experimento, difícil de ser descrito, envolvia a

[34] Ver P. Costabel, "L. Foucault et H. Fizeau: Exploitation d'une information nouvelle", pp. 235-249.

[35] H. Fizeau, "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse à laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", pp. 349-355. Ver, a esse respeito: F. Selleri, "On the Fizeau Experiment", pp. 71-82; I. Lerche, "The Fizeau effect: Theory, experiment, and Zeeman's meansurements", pp. 1154 – 1163.

[36] E. Buchwald, "Hundert Jahre Fizeauscher Mitfuhrungsversuch", pp. 519-524. Observe-se que esse efeito, previsto pela teoria do éter, também pode ser explicado através da teoria da relatividade. Ver, por exemplo: R. Newburgh, "Fresnel drag and principle of relativity", pp. 379-386; L. Blitzer, "On the meaning of the Fresnel coefficient of ether drag in relativity", pp. 446-448.

[37] A. H. Fizeau, "Idee zur Messung der Umlaufsbewegung der Erde", pp. 652-655. Ver também: P. Acloque, "Hippolyte Fizeau et le mouvement de la Terre: Une tentative méconnue", pp. 145-158.

[38] A. H. Fizeau, "Sur une méthode propre à rechercher, si l'azimut de polarization du rayon réfracté, est influencé par le mouvement du corps réfringent. Essai de cette méthode", pp. 129-163.

observação da rotação do plano de polarização da luz ao passar por uma pilha de placas de vidro inclinadas em relação ao feixe incidente. A própria previsão quantitativa do fenômeno era difícil. Fizeau previu, para seu arranjo, que haveria um efeito total de aproximadamente 2^o, e que o efeito mudaria quando a aparelhagem mudasse de posição pela própria rotação da Terra em torno do seu eixo. Fazendo um total de 2.000 observações, notou efeitos sistemáticos bastante regulares, que variaram entre $1,3^o$ e $2,6^o$, estando portanto próximos ao efeito esperado.

Outros pesquisadores procuraram também detectar o movimento da Terra através do éter, através de outros métodos. Como a teoria de Fresnel previa que a maior parte dos efeitos (envolvendo especialmente aberração, reflexão e refração) deveriam acabar levando a um resultado nulo, foram procurados efeitos de outros tipos. Em 1862, Babinet sugeriu que talvez o desvio da luz por uma rede de difração pudesse evidenciar o movimento da Terra[39]. Dois anos depois (1864), o famoso espectroscopista Anders Jonas Ångstrom (1814-1874) publicou os resultados de medidas em que, aparentemente, mediu esse efeito[40].

Graças, portanto, a uma série de delicados experimentos que haviam proporcionado resultados positivos, havia bons motivos para acreditar na teoria do éter de Fresnel, nessa época. Em 1867 James Clerk Maxwell (1831-1879) estudou esses trabalhos e também investigou, experimentalmente, se o movimento da Terra afetaria o desvio da luz por um prisma, confirmando o resultado nulo já obtido por Arago várias décadas antes[41].

3.10 Experimentos com telescópio cheio de água

Durante as décadas de 1860 e 1870 foram feitos vários experimentos com telescópios cheios de água, conforme havia sido proposto no final do século XVIII.

Em 1861 Lorenzo Respighi (1824-1889) fez uma experiência de aberração terrestre. Observa através de um telescópio cheio de água, uma fonte luminosa terrestre. Segundo a teoria de Fresnel, a aberração não deveria existir. Respighi observou apenas pequenos deslocamentos desordenados da direção da fonte luminosa observada ao telescópio, que o levam a concluir que a experiência é favorável à teoria de Fresnel[42].

Uma experiência realizada pelo astrônomo Ernst Friedrich Wilhelm Klinkerfues (1827-1884) em 1867, entretanto, apresentou uma conclusão contrária à teoria Fresnel[43]. Ele realizou a experiência de aberração astronômica com o telescópio contendo o tubo cheio d'água. Previu que, se não ocorresse o cancelamento dos efeitos previsto pela teoria de Fresnel, deveria ser observada uma variação de 8" de arco na ascensão reta de certas estrelas, e afirmou ter observado efeitos de aproximadamente 7", contrários à teoria de Fresnel.

Pouco tempo depois, Martinus Hoek (1834-1873) realizou dois experimentos que deram resultados favoráveis à teoria de Fresnel. A primeira, em 1868, era semelhante à de Babinet (em 1839), e as observações confirmaram o resultado nulo. No ano seguinte, ele realizou a experiência de aberração terrestre com o telescópio cheio de água, e concluiu que existe o arrastamento do éter previsto por Fresnel[44].

---

[39] J. Babinet, "De l'Influence du Mouvement de la Terra dans les Phénomènes Optiques", pp. 561-564.

[40] A. J. Ångström, "Neue Bestimmung der Länge der Lichtwellen, nebst einer Methode, auf optischem Wege die fortschreitende Bewegung des Sonnensystems zu bestimmen", pp. 489 - 505.

[41] J. C. Maxwell, "On the Influence of the Motions of the Heavenly Bodies on the Index of Refraction of Light", pp. 532-535.

[42] L. Respighi, "Intorno l'Influenza del Moto dei Mezzi Rifrangenti sullaDirezione dei Raggi Luminosi", pp. 279-304.

[43] E. F. W. Klinkerfues, "Untersuchungen aus der analytischen Optik, insbesondere über den Einfluss der Bewegung der Lichtquelle auf die Brechung", pp. 337-366.

[44] M. Hoek, "Détermination de la Vitesse avec Laquelle est Entraînée une onde Lumineuse Traversant un Milieu en Mouvement", pp. 180-185; *idem*, "Détermination de La Vitesse, avec Laquelle est Entraîné un Rayon Lumineux Traversant un Milieu en Mouvement", pp. 443-450. Ver também: H. Melcher, "Ätherdrift und Relativität: Michelson, Einstein, Fizeau und Hoek", pp. 46-67.

O astrônomo inglês George Biddell Airy (1801-1892) repetiu os experimentos de Klinkerfues sobre aberração estelar utilizando um telescópio chio de água, em 1872-3. Fez medidas da declinação da estrela δ de Draco com intervalos de 6 meses. Airy concluiu que a aberração estelar tem sempre o mesmo valor, com ou sem água e que, portanto, Klinkerfues estava errado[45].

3.11 As pesquisas de Veltmann, Potier e Mascart

A teoria do éter de Fresnel havia previsto que qualquer experimento óptico terrestre envolvendo aberração, reflexão e refração acabaria por não apresentar qualquer efeito mensurável devido ao movimento da Terra através do éter, porque haveria um cancelamento de diversos efeitos[46]. Como vimos, Stokes já havia feito uma demonstração dessa conseqüência. No entanto, uma análise teórica mais completa do problema foi realizada apenas no início da década de 1870, por três pesquisadores: Wilhelm Veltmann (1832-1902), Alfred Potier (1840-1905) e Éleuthère Élie Nicolas Mascart (1837-1908)[47].

O ponto de partida de Veltmann foi o experimento de aberração, e ele apresentou em 1870 uma boa análise desse e de outros experimentos ópticos, mostrando que todos deveriam proporcionar resultados nulos, de acordo com a teoria de Fresnel[48]. Em 1872 e 1874, Mascart publicou trabalhos em que investigou experimentalmente se havia algum efeito óptico observável devido ao movimento da Terra através do éter, obtendo sempre resultados nulos – inclusive ao repetir os experimentos de Fizeau e de Ångström que haviam dado resultados positivos[49]. A conclusão de Mascart foi:

> A conclusão geral dessa Memória será portanto [...] que o movimento de translação da Terra não tem nenhuma influência apreciável sobre os fenômenos de óptica produzidos com uma fonte terrestre ou com a luz solar, que esses fenômenos não nos dão um meio de apreciar o movimento *absoluto* de um corpo e que os movimentos *relativos* são os únicos que podemos atingir.[50]

Mascart parece ter sido quem melhor estabeleceu experimentalmente o princípio da relatividade na óptica, para experimentos de primeira ordem, justificando também teoricamente esses resultados com a teoria de Fresnel[51]. No mesmo ano em que Mascart apresentou seu segundo trabalho sobre o assunto, Potier publicou uma importante análise teórica que complementava as de Veltmann e de Mascart[52].

3.12 Maxwell e o éter

---

[45] G. B. Airy, "On a supposed Alteration in the amount of Astronomical Aberration of Light, Produced by the Passage of Light through a considerable thickness of Refracting Medium", pp. 310 - 313.

[46] No caso, o cancelamento ocorre para termos de *primeira ordem* em *v/c*.

[47] R. Newburgh, "Fresnel drag and principle of relativity", pp. 379-386; E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, p. 114.

[48] W. Veltmann, "Fresnel's Hypothese zur Erklärung der Aberrationserscheinungen", pp. 145 - 160; *idem*, "Ueber die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien", pp. 129-144.

[49] E. Mascart, "Modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur", pp. 363-420.

[50] *Ibid.*, p. 420.

[51] Veja a respeito a tese do prof. Maurício Pietrocola : M. P. P. Oliveira, *Mascart et L'Optique de corps en Mouvement.*

[52] A. Potier, "Conséquences de la Formule de Fresnel relative a l'entraînement de l'Éther par les Milieux Transparents", pp. 201-204.

O princípio da relatividade na óptica ondulatória é, de certa forma, mais espantoso do que o da mecânica, pois torna impossível detectar um movimento *relativo* entre a Terra e o éter (que se supunha ser a realidade física transmissora da luz).

A situação não era totalmente clara, no entanto, já que alguns experimentos (de Fizeau, Ångström e Klinkerfues) haviam indicados efeitos positivos do movimento da Terra através do éter, contrariando a teoria de Fresnel. E, apesar das análises teóricas acima referidas, continuava aberta a possibilidade de que talvez houvesse outros fenômenos ópticos (que não dependessem apenas de aberração, reflexão e refração) que pudessem exibir efeitos do movimento da Terra através do éter.

Em 1878, um ano antes de sua morte, Maxwell publicou um famoso verbete sobre o éter na *Encyclopaedia Britannica*[53], no qual analisa novos métodos para determinar a velocidade da Terra através do éter. Um deles se baseia na medida do tempo que a luz demora para ir e voltar entre dois pontos, quando esse movimento é paralelo ou perpendicular à velocidade da Terra. O efeito seria de segunda ordem em v/c, ou seja, da ordem de 10^{-8} – impossível de medir diretamente[54]. Talvez houvesse, no entanto, outra possibilidade: detectar um efeito de primeira ordem, associado ao estudo dos eclipses dos satélites de Júpiter. No ano seguinte, Maxwell escreveu uma carta a David Peck Todd, um astrônomo que estudava os satélites de Júpiter, perguntando-lhe se havia dados suficientemente precisos para fazer esse tipo de análise[55]. No entanto, os dados não eram adequados para tal.

Este era o contexto quando Michelson iniciou seus estudos. Depois disso, a história é razoavelmente conhecida. Não vamos procurar descrevê-la aqui.

BIBLIOGRAFIA

A) FONTES PRIMÁRIAS

AIRY, G. B. "On a supposed Alteration in the amount of Astronomical Aberration of Light, Produced by the Passage of Light through a considerable thickness of Refracting Medium". *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [série 4] 43 (1872): 310-313.

———. "Additional note to the paper: On a Supposed Alteration in the Amount of Astronomical Aberration of Light produced by the Passage of the Light through considerable thickness of Refracting Medium". *Proceedings of the Royal Society of London*, 21 (1873): 121-123.

ÅNGSTRÖM, A. J. "Neue Bestimmung der Länge der Lichtwellen, nebst einer Methode, auf optischem Wege die fortschreitende Bewegung des Sonnensystems zu bestimmen". *Annalen der Physik und Chemie,* 123 (1864): 489-505.

———. "On a new Determination of the Lengths of Waves of Light, and on a Method of determining, by Optics, the translatory Motion of the Solar System". *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [série 4] 29 (1865): 489-501.

ARAGO, F. "Mémoire sur la vitesse de la Lumière, lu à la première Classe de l'Institut, le 10 décembre 1819". *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences de Paris,* 36 (1853): 38-49.

[53] J. C. Maxwell, "Ether", em *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, pp. 763-775.

[54] Apesar de ser impossível de realizar diretamente, o método aqui proposto por Maxwell serviu de inspiração para a construção do interferômetro de Michelson. Ver: R. S. Shankland, "Michelson-Morley Experiment", pp. 16-35.

[55] J. C. Maxwell, "On a possible mode of detecting a motion of the Solar System through the luminiferous ether", pp. 108-110.

BABINET, J. “Sur l’Aberration de la Lumière”. *Comptes Rendus des Séances de l’Académie des Sciences de Paris,* 9 (1839): 774-775.

———. “De l’Influence du Mouvement de la Terra dans les Phénomènes Optiques”. *Comptes Rendus des Séances de l’Académie des Sciences de Paris*, 55 (1862): 561-564.

BEER, A. von. “Ueber Aberration des Lichtes”. *Annalen der Physik*, 93 (1860): 213-223.

CHALLIS, A. “On the Theory of the Aberration of Light”. *The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* [série 4] 43 (1872): 289-95.

FAYE, M. “Sur les Expériences de M. Fizeau considerés au Point de vue du Mouvement de Translation du Système Solaire”. *Comptes Rendus des Séances de l’Académie des Sciences de Paris,* 49 (1859): 870-875.

———. “Réponse à une Note de M. de Tessan (séance du 19 Décembre)”. *Comptes Rendus des Séances de l’Académie des Sciences de Paris,* 49 (1859): 993-994.

FIZEAU, H. “Sur les hypothèses relatives à l’éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse à laquelle la lumière se propage dans leur intérieur”. *Comptes Rendus des Séances de l’Académie des Sciences de Paris* 33 (1851): 349–355.

———. “Sur les hypothèses relatives à l’éther lumineux. Et sur une expérience qui parait démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avee laquelle la lumière se propage dans leur intérieur”. *Annalen der Physik und Chemie*, 57 (1859): 385-404.

———. “Sur une méthode propre à rechercher, si l’azimut de polarization du rayon réfracté, est influencé par le mouvement du corps réfringent. Essai de cette méthode”. *Comptes Rendus des Séances de l’Académie des Sciences de Paris*, 49 (1859): 717-723.

———. “Sur une Methode Propre a Rechercher si l’Azimut de Polarization du rayon Réfracté est Influence par le mouvement du corps Réfringent, - Essai de cette Méthode”. *Annales de Chimie et de Physique*, 58 (1860): 129-163.

FRESNEL, A. “Lettre d’Augustin Fresnel à François Arago sur l’influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d’optique”. *Annales de Chimie et de Physique* 9 (1818): 57–66 ; 286.

———. *Oeuvres Complètes d’Augustin Fresnel.* Henri de Senarmont, Émile Verdet et Léonor Fresnel, eds. Vol. 2, Paris, Imprimiérie Impériale, 1868. 3 vols.

HOEK, M. “Sur la Différence entre les Valeurs de la Constante de l’Aberration d’Après Delambre et Struve”. *Astronomische Nachrichten*, 70 (1867): 193-198.

———. “Détermination de la Vitesse avec Laquelle est Entraînée une onde Lumineuse Traversant un Milieu en Mouvement”. *Archives Neérlandaise des Sciences Exactes et Naturelles*, 3 (1868): 180-185.

———. “Détermination de La Vitesse, avec Laquelle est Entraîné un Rayon Lumineux Traversant un Milieu en Mouvement”. *Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles*, 4 (1869): 443-450.

———. “Sur la Différence entre les Constantes de l’Aberration d’après Delambre et Struve”. *Astronomische Nachrichten*, 73 (1869): 193-200.

KLINKERFUES, W. “Untersuchungen aus der analytischen Optik, insbesondere über den Einfluss der Bewegung der Lichtquelle auf die Brechung”. *Astronomische Nachrichten*, 66 (1866): 337-366.

———. “Ueber die in No. 1669 der Astronomische Nachrichten gegebene Erklärung der Differenz zwischen Delambre’s und Struve’s Aberration”. *Astronomische Nachrichten*, 70 (1869): 239-240.

LODGE, O. J. “Aberration Problems.-A Discussion concerning the Motion of the Ether near the Earth, and concerning the Connexion between Ether and Gross Matter; with some new Experiments”. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 184 A (1893): 727-804.

LORENTZ, H. A. *Lectures on Theoretical Physics.* Trad. L. Silberstein. & A. P. H. Trivelli. London, Mc Millan, 1927-1931. 3 vols.

———. "De l'Influence du Mouvement de la Terre sur les Phénomènes Lumineux". *Archives Néerlandaises*, 21 (1887) : 103-159. Reproduzido em vol. 4, pp. 153-214, *in*: LORENTZ, H. A. *Collected Papers*. The Hague, Martinus Nijhoff, 1937.

MASCART, E. "Sur les Modifications qu'Eprouve la Lumière par Suite du Mouvement de la source lumineuse et du Mouvement de l'observateur". *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure*, 1 (1872): 157-214.

———. "Modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur". *Annales Scientifiques de l'École Normale Supérieure,* 3 (1874): 363 - 420

MAXWELL, J. C. "On the Influence of the Motions of the Heavenly Bodies on the Index of Refraction of Light". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 158 (1868): 532-535.

———. "On a possible mode of detecting a motion of the Solar System through the luminiferous ether". *Proceedings of the Royal Society* 30 (1880): 108-110.

———. *The scientific papers of James Clerk Maxwell*. Ed. William Davidson Niven. New York: Dover, 1965.

NEWTON, I. *Mathematical Principles of Natural Philosophy. Optics.* Trad. A. Motte.. Chicago, Encyclopaedia Britannica, 1952. (Great Books of Western World, Vol. 34). 2ª ed.

PREVOST, P. "De l'effet du mouvement d'un plan réfringent sur la réfraction". *Annales de Chimie et de Physique*, 16 (1821): 183-191.

POTIER, A. "Conséquences de la Formule de Fresnel relative à l'entraînement de l'Éther par les Milieux Transparents". *Journal de Physique Théorique et Appliquée* 3 (1874): 201-204.

RAYLEIGH, Lord [John William Strutt]. "Aberration". *Nature* 45 (1892): 499-502. Reproduzido em vol. 3, pp. 542-553, *in*: RAYLEIGH, Lord. *Scientific papers.* New York, Dover, 1964. 6 vols.

RESPIGHI, L. "Intorno l'Influenza del Moto dei Mezzi Rifrangenti sullaDirezione dei Raggi Luminosi". *Memorie della Reale Accademia dell Scienze dell' Istituto di Bologna*, 2 (1861): 279-304.

ROBISON, J. "On the Motion of Light, as affected by refracting and reflecting Substances, which are also in Motion". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2 (1790): 83 - 111.

STOKES, G. G. *Mathematical and Physical Papers.* New York, Johnson Reprint, 1966. 5 vols.

TESSAN, M. "Note relative à une communication de M. Faye". *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences de Paris*, 49 (1859): 980-981.

VELTMANN, W. "Fresnel's Hypothese zur Erklärung der Aberrationserscheinungen". *Astronomische Nachrichten*, 75 (1870): 145-160.

———. "Ueber die Fortpflanzung des Lichts in bewegten Medien". *Astronomische Nachrichten*, 76 (1870): 129-144.

WILSON, P. "An Experiment proposed for determining, by the Aberration of the Fixed Stars, whether the Rays of Light, in pervading different Media, change their velocity according to the Law which results from Sir Isaac Newton's Ideas concerning the cause of Refraction; and for ascertaining their Velocity in every Medium Whose refractive Density is known". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 72 (1782): 58-70.

B) **FONTES SECUNDÁRIAS**

ACHINSTEIN, P. *Particles and waves: Historical essays in the philosophy of science*. New York, Oxford Univ. Press, 1991.

ACLOQUE, P. “Hippolyte Fizeau et le mouvement de la Terre: Une tentative méconnue”. *La Vie des Sciences: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 1 (1984): 145-158.

———. *L'aberration stellaire: Un mirage qui a destitué l'éther*. Paris, Société Française d'Histoire des Sciences et des Techniques, 1991.

BASDEVANT, J.-L. “Augustin Fresnel; Engineer and Physicist”. *Journal of Physics,* 20 (3, 1989): 101-8.

BLITZER, L. “On the meaning of the Fresnel coefficient of ether drag in relativity”. *American Journal of Physics* 15 (6, 1947):446-448.

BUCHWALD, E. “Hundert Jahre Fizeauscher Mitfuhrungsversuch”. *Naturwissenschaften* 38 (22, 1951): 519-524.

BUCHWALD, J. Z. “The battle between Arago and Biot over Fresnel”. *Journal of Physics*, 20 (1989): 109-117.

———. *The Rise of the Wave Theory of Light. Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*. Chicago / London, The University of Chicago Press, 1989.

CANTOR, G. N. “Was Thomas Young a wave theorist?” *American Journal of Physics* 52 (4, 1984): 305-308.

CAVALLERI, G. & GALGANI, L; SPAVIERI, G. et al. “Classical optics experiments and ether”. *Scientia,* 111 (9-12, 1976): 675-679.

CHEN, X. “The debate on the “polarity of light” during the optical revolution”. *Archives for the History of Exact Sciences,* 50 (1997): 359-393.

COSTABEL, P. “L. Foucault et H. Fizeau: Exploitation d'une information nouvelle”. *La Vie des Sciences: Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 1 (1984): 235-249.

DARRIGOL, O. “The electrodynamic origins of relativity theory”. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences,* 26 (1996): 241-312.

DUTOUR, F. & ROSMORDUC, V., ROSMORDUC, J. *Les révolutions de l'optique et l'oeuvre de Fresnel.* Préface de Michel Blay. Paris, Adapt-Snes / Vuibert, 2004. (Collection Inflexions)

EISENSTAEDT, J. “Newtonian ballistic optics in relation to the satellites of Jupiter”. *Archive for the History of Exact Sciences* 50 (2, 1996): 117-156.

FRANKEL, E. “Corpuscular Optics and Wave Theory of Light - Science and Politics of a Revolution in Physics”. *Social Studies of Science* 6 (2, 1976): 141-184.

FUKS, S. ed. *Descartes 400 anos. Um Legado Científico e Filosófico*. Rio de Janeiro, Relume Dumará, 1998.

GANCI, S. “Le teorie della diffrazione di T. Young e di A. Fresnel”. *Giornale di Fisica* 33 (1992): 199-206.

GIANNETTO, E. “The Rise of Special Relativity: Henri Poincaré's Works before Einstein”. Pp. 171-207, *in*: *XVIII Congresso di Storia della Fisica e dell'Astronomia*. Milano, Istituto di Física Generale Applicata / Centro Volta de Como, 1998.

GIUDICE, F. “La tradizione del mezzo e la Nuova teoria della luce di Leonhard Euler”. *Nuncius* 15 (2000): 3-49.

HAKFOORT, C. *Optics in the Age of Euler: Conceptions of the Nature of Light, 1700–1795.* Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

HIROSIGE, Tetu. “The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity”. *Historical Studies in the Physical Sciences,* 7 (1976): 3 –82.

HOME, R. W. “Leonhard Euler's 'anti-Newtonian' theory of light”. *Annals of Science* 45 (1988): 521-533.

HUNT, B. “Experimenting on the ether: Oliver J. Lodge and the great whirling machine”. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 16 (1986): 111-134.

JAMES, F. A. J. L. “The physical interpretation of the wave theory of light”. *British Journal for the History of Science* 17 (55, 1984): 47-60.

JANSSEN, M. *A Comparison between Lorentz's Ether Theory and Special Relativity in the Light of the Experiments of Trouton and Noble*. Tese de Doutorado. Pittsburgh, University of Pittsburgh, 1995.[56]

KESWAMI, G. H. & C. W. Kilmister. "Intimations of Relativity. Relativity Before Einstein". *British Journal of Philosophical Science*, 34 (1983): 343-354.

KUIKEN, H. K. "H. A. Lorentz: Sketches of his work on slow viscous flow and some other areas in fluid mechanics and the background against which it arose". *Journal of Engineering Mathematics* 30 (1-2, 1996): 1-18.

LERCHE, I. "Fizeau effect-theory, experiment, and Zeeman's measurements". *American Journal of Physics* 45 (12, 1977): 1154-1163.

LEVITT, T. "Editing out caloric: Fresnel, Arago and the meaning of light. *British Journal of the History of Science* 33 (116, 2000): 49-65.

LIEBSCHER, D.-E. & P. Brosche. "Aberration and Relativity". *Astronomische Nachrichten*, 319 (1998): 309-18.

MANSOURI, R.; SEXL, R. U. "Test theory of special relativity. 2. 1st order tests". *General Relativity and Gravitation* 8 (7, 1977): 515-524.

MARTINS, R. de A. "Galileo e o Princípio da Relatividade". *Cadernos de História e Filosofia da Ciência*, 9 (1986): 69-86.

———. "A Popperian Evaluation of Einstein's Theory-plus-method". *Manuscrito*, 9 (2, 1986): 95-124.

———. "Huygens e a Gravitação Newtoniana". *Caderno de História e Filosofia da Ciência*, 2 (1989): 151-184.

MAYRARGUE, A. "Fresnel and optical ether". *La Recherche,* 21 (218, 1990): 234-237.

MELCHER, H. "Ätherdrift und Relativität: Michelson, Einstein, Fizeau und Hoek". *NTM: Zeitschrift für Geschichte der Naturwissenschaft, Technik und Medizin* 19 (1982): 46-67.

MILLER, A. I. *Albert Einstein's special theory of relativity: emergence (1905) and early interpretation (1905-1911)*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1981.

MOLLON, J. D. "The Origins of the Concept of Interference". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* 360 (2002): 807-819.

NASCIMENTO, U. "On the Trail of Fresnel's Search for an Ether Wind". *Apeiron*, 5 (1998): 181-192.

NERSESSIAN, N. J. "Aether/or: The Creation of Scientific Concepts". *Studies in the History and Philosophy of Science*, 15 (1984): 175-212.

NEWBURGH, R. "Fresnel drag and principle of relativity". *Isis,* 65 (228, 1974): 379-386.

NEWBURGH, R. G. & O. C. de Beauregard. "Experimental search for anisotropy in speed of light". *American Journal of Physics,* 43 (6, 1975): 528-530.

OLIVEIRA, M. P. P. *Mascart et l'Optique de corps en Mouvement*. Tese de Doutorado. Paris, Université de Paris, 1992.

PEDERSEN, K. M. "Roger Boscovich and John Robison on terrestrial aberration". *Centaurus* 24 (1980): 335-345.

———. "Water-Filled Telescopes and the Pre-History of Fresnel's Ether Dragging". *Archive for the History of Exact Science*, 54 (2000): 499-564.

PETRUCCIOLI, S. ed. *Storia della Scienza*. Roma, Instituto della Enciclopédia Italiana, 2001.

PIPPARD, B. "Dispersion in the ether: Light over the water". *Physics in Perspective,* 3 (3, 2001): 258-270.

REIGNIER, J. "Éther et mouvement absolu au 19ème siècle". *Revue des Questions Scientifiques,* 170 (1999): 261-282.

[56] Disponível em <http://www.mpiwgberlin.mpg.de/litserv/diss/janssen_diss/TitleTOC.pdf>

REIGNIER, J. “De l'éther de Fresnel à la relativité restreinte”. *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 29 (2004): 21-56.

RENSHAW, C. “Fresnel, Fizeau, Hoek, Michelson-Morley, Michelson-Gale and Sagnac in Aetherless Galilean Space”. *Galilean Electrodynamics,* 7 (6, 1996): 103-130.

SCHAFFNER, K. F. *Nineteenth century aether theories*. Oxford / New York: Pergamon Press, 1972.

SCRIBNER, Jr., C. “Henri Poincaré and the Principle of Relativity”. *American Journal of Physics*, 32 (1964): 672-678.

SELLERI, F. “On the Fizeau experiment”. *Foundations of Physics Letters,* 16 (1, 2003): 71-82.

SHANKLAND, R. S. “Michelson-Morley Experiment”. *American Journal of Physics*, 32 (1964): 16-35.

SPAVIERI, G. & G. Contreras. “The Arago experiment as a test for modern ether theories and special relativity”. *Nuovo Cimento*, B 91 (2, 1996): 143-156.

STEWART, A. B. “The Discovery of Stellar Aberration”. *Scientific American*, 210 (3, 1964): 100-107.

SWENSON, Loyd S. *The ethereal aether – a history of the Michelson-Morley-Miller aether drift experiments, 1880 –1930*. Austin, University of Texas Press, 1972.

TATON, R. (ed.). *Roemer et la vitesse de la lumière*. Table ronde du Centre national de la recherche scientifique: Paris, 16 et 17 juin 1976. Paris, Librairie Philosophique Vrin, 1978.

TOBIN, W. “Toothed wheels and rotating mirrors: Parisian astronomy and mid-nineteenth century experimental measurements of the speed of light”. *Vistas in Astronomy,* 36 (3, 1993): 253-294.

WHITTAKER, E. T. *A history of the theories of aether and electricity*. London, Nelson, 1953. 2 vols.[57]

WILSON, D. B. “G. G. Stokes on stellar aberration and luminiferous ether”. *British Journal for the History of Science,* 6 (21, 1972): 57-72.

WORRALL, J. “Thomas Young and the “refutation” of Newtonian optics: A case-study in the interaction of philosophy of science and history of science”. Pp. 107-179, *in*: HOWSON, C. (ed.). *Method and appraisal in the physical sciences*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1976.

———. “How to remain (reasonably) optimistic: Scientific realism and the *luminiferous ether*”. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1 (1994): 334-342.

ZAPFFE, C. A. “Magnetospheric ether-drag theory and the reference frames of relativistic physics”. *Speculations in Science and Technology,* 2 (4, 1979): 439-459.

———. “Telescopic aberration”. *Speculations in Science and Technology* 9 (1, 1986): 41-50.

ZERNIKE, F. “The convection of light under various circumstances with special reference to Zeeman experiments”. *Physica,* 13 (4-5, 1947): 279-288.

[57] Reimpresso como Vol. 7 da série *The history of modern physics, 1800 –1950*. Thomas Publishers / American Institute of Physics, 1987.