

## A óptica dos corpos em movimento de Fresnel sob a visão do realismo estrutural: ensino de natureza da ciência e as demandas educacionais da contemporaneidade

*Fresnel's optics of moving bodies under de view of structural realism: nature of science teaching and the educational demands of the contemporaneity*

Felipe Prado Corrêa Pereira | Universidade de São Paulo

[felipe.prado.pereira@usp.br](mailto:felipe.prado.pereira@usp.br)

<https://orcid.org/0000-0002-2762-4505>

Ivã Gurgel | Universidade de São Paulo

[gurgel@usp.br](mailto:gurgel@usp.br)

<https://orcid.org/0000-0003-4968-6907>

**RESUMO** O presente artigo tem o objetivo de apresentar um estudo de episódio histórico, a saber o estudo da óptica dos corpos em movimento no século XIX, e discutir suas implicações epistemológicas e educacionais. Por meio de uma análise em epistemologia histórica, realizamos reflexões acerca da provisoriade do conhecimento científico e o abandono de entidades teóricas da ciência do passado, com o intuito de criar uma argumentação em favor da confiabilidade dos conhecimentos científicos. Apoiando-nos em formas críticas de realismo científico, objetivamos defender visões de ciência que sejam ontologicamente relativistas, mantendo concepções realistas e objetivistas críticas perante a ciência.

**Palavras-chave** história da ciência – ensino de ciências – epistemologia – óptica.

**ABSTRACT** This article aims to present a study of a historical episode, namely the study of the optics of moving bodies in the 19th century, and to discuss its epistemological and educational implications. Through an analysis of historical epistemology, we carried out reflections on the provisionality of scientific

*knowledge and the abandonment of theoretical entities of the science of the past, in order to create an argument in favor of the reliability of scientific knowledge. By relying on critical forms of scientific realism, we aim to defend views of science that are ontologically relativist, maintaining critical realistic and objectivist conceptions of science.*

**Palavras-chave** *history of science – science teaching – epistemology – optics.*

## **Introdução: o ensino de natureza da ciência e as demandas da contemporaneidade**

Estudos que lidam com a interface entre a história e o ensino de ciências se estabeleceram como uma linha de pesquisa que conta com sua própria tradição, tanto no âmbito global quanto no contexto latino-americano. Um dos objetivos associados a esta abordagem para o ensino de ciências é a ruptura com modelos de ensino demasiadamente tecnicistas e formulistas (Zanetic, 1990), visando a construção de perspectivas mais críticas e humanizadas em relação à atividade científica e aos produtos e conteúdos cognitivos da ciência (Matthews, 2014). Além de ser um potencial veículo para o ensino dos conteúdos específicos da ciência, as abordagens históricas/filosóficas/sociológicas são comumente empregadas com o objetivo de se ensinar *sobre as ciências*. Por meio destas, busca-se abordar, por exemplo: as origens históricas das ideias científicas; a mútua influência entre a cultura científica e a cultura geral; as condições políticas e institucionais para o estabelecimento do conhecimento; os meios de legitimação social da ciência; valores e metodologias subjacentes à sua construção; questões éticas da ciência e tecnologia; suas bases filosóficas da investigação; a dinâmica da mudança do conhecimento científico, entre muitos outros tópicos de interesse das chamadas disciplinas metacientíficas. Esses assuntos são relevantes a uma educação científica crítica, isso é, que dê subsídios para que o educando reconheça tanto as virtudes e potencialidades da ciência, quanto seus limites. Dentro da tradição da história, filosofia e sociologia no ensino de ciências, convencionou-se chamar o ensino e os conteúdos desta classe de tópicos de natureza da ciência (NdC).

O ensino de *conhecimentos sobre a ciência* esteve, ao longo das últimas décadas, muito associado a uma demanda derivada de reiterados diagnósticos acerca da alegada inadequação das visões de ciência compartilhada tanto por alunos do ensino básico, quanto por professores de ciências (Lederman, 2002, 2007; McComas, 1996; Pérez et al., 2001). Dentre elas se destacam: concepções empírico-indutivistas e ateóricas da ciência, segundo as quais o conhecimento se identifica com uma acumulação de fatos empíricos desacoplados de uma base teórica e conceitual; a crença em um método científico tão infalível quanto inflexível, contando com etapas rígidas e algorítmicas; a ciência como uma atividade descontextualizada histórica e socialmente; crescimento linear e cumulativo da ciência e da tecnologia, entre outras sintetizadas por Pereira e Gurgel (2020).

A uniformidade dos diagnósticos revelados por diferentes pesquisas acerca das visões de ciência em professores e alunos incentivou a formulação de um conjunto de conteúdos sobre a NdC que fizesse frente às indesejáveis concepções ingênuas; as chamadas de visões consensuais de natureza da ciência. Com uma grande intersecção de conteúdos, se notabilizaram na literatura as listas de visões consensuais formuladas por Lederman e colaboradores (2002) e McComas, Almazroa e Clough (1998), que buscavam jogar luz a aspectos da ciência negligenciados pelas

concepções ingênuas, dentre os quais se destacam: a provisoriedade do conhecimento científico; a inexistência de um método científico único; a importância da imaginação e criatividade na ciência; a imbricação entre a ciência e o contexto histórico, cultural e social no qual ela foi produzida; os compromissos teóricos e metodológicos subjacentes à toda observação ou experimentação científica; os diferentes papéis desempenhados pelas leis, modelos e teorias na construção do conhecimento; a existência de revoluções científicas, em contraposição à ideia de desenvolvimento cumulativo; entre outros. É importante notarmos que essas listas de conteúdos buscam fazer frente a concepções que exageravam e idealizavam as virtudes e as capacidades do empreendimento científico e deslocar o entendimento sobre a ciência para um campo mais crítico e mais solidário às tendências das disciplinas metacientíficas, cujo estado da arte, naquele momento, remetia à autores como Thomas Kuhn, Gaston Bachelard, Imre Lakatos, Paul Feyerabend, entre tantos outros pensadores de grande reconhecimento.

Apesar de as visões inadequadas sobre a ciência ainda serem uma questão educacional relevante até os dias de hoje e as listas de visões consensuais<sup>1</sup> ainda apontarem para a superação destes obstáculos, a contemporaneidade tem oferecido novos desafios em relação à educação sobre as ciências naturais. Não é difícil constatar que discursos anticientíficos têm ganhado força na sociedade, sendo inclusive propagados pelo Estado e por líderes políticos de tendências autoritárias. A relativização da noção de verdade, que se comunica com as ondas de *fake news* e com a chamada era da pós-verdade, tem minado a confiança de parcela da população na ciência e nos cientistas. Argumentamos que os estudos sobre o ensino da natureza da ciência se encontram em uma espécie de encruzilhada. Por um lado, a persistência de visões ingênuas que se aproximam de uma forma caricata de positivismo continua viva, o que faz necessário algum grau de relativização das potencialidades da ciência, distanciando-a de noções que imputem a ela o *status* de verdade absoluta e indefinidamente confiável, como as listas das visões consensuais buscam fazer. Por outro lado, deve-se ter cautela neste movimento para que o discurso metacientífico não resvale, ou dê margem para interpretações extremamente relativistas da atividade e dos conteúdos das ciências (Forato, Pietrocola e Martins, 2011; Martins 2015; Romero-Maltrana et al., 2017). O emprego de visões realistas críticas como antídoto a formas exageradas de relativismo também fora sugerido por Arthury e Garcia (2020), ao argumentar que as teorias científicas se situam entre a livre criação humana e materialidade concreta do mundo e seus fenômenos. Subsídios filosóficos a respeito das vinculações entre modelos teóricos e realidade, no contexto do ensino de ciências, também foram discutidos por Cupani e Pietrocola (2002). Estudos sobre as relações entre o realismo científico e o ensino de ciências, apesar de pouco numerosos, mostram-se relevantes para o debate educacional. O dilema de não se recair nem em um cientificismo, nem um relativismo extremo é explorado em mais detalhe em Pereira e Gurgel (2020),<sup>2</sup> e será o ponto de partida para as discussões que se seguirão neste artigo.<sup>3</sup>

A discussão desenvolvida no referido artigo – que é retomada aqui e guarda relevância a respeito da confiança na ciência e seu valor epistêmico – versa sobre o dilema entre continuidade

1 É importante pontuar que as listas das visões consensuais foram alvos recorrentes de críticas na literatura especializada (Alters 1997; Eflin, Glennan e Reisch, 1999; Allchin, 2011; Matthews, 2012; Irzik, Nola, 2011; Martins, 2015).

2 Publicado em um número especial do *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* que aborda o tema “Ciências e educação científica em tempos de pós-verdade”.

3 Ambas presentes na dissertação de mestrado do primeiro autor, Pereira (2021).

e descontinuidade do conhecimento científico. A provisoriedade desses conhecimentos pode ser motor tanto para visões mais críticas e menos idealizadas das ciências, quanto pode incentivar noções que as desvalorizem e motivem uma exagerada desconfiança acerca das conclusões e produtos de teorias, modelos e resultados da ciência de maneira mais geral. Está em jogo, portanto, o tema da falibilidade e da mudança da ciência. Este pode ser um tema de relevo em diversas dimensões da produção científica, uma vez que pode se referir à revisão ou refutação de resultados bastante pontuais e locais no interior de uma dada linha de pesquisa. Porém, pode versar também sobre ressystematizações radicais, “levando à necessidade de grandes reestruturas conceituais e alterações de visão de mundo” (Pereira e Gurgel, 2020, p. 1292) em uma dada área. Este último exemplo de falibilidade, associado ao abandono de teorias do passado e à mudança científica, está presente em McComas, Almazroa e Clough (1998), ao salientar que a ciência progride, por vezes, de maneira *revolucionária*, o que remete à impactante obra de Thomas Kuhn, *A estrutura das revoluções científicas*, publicada em 1962. O ensaio de Kuhn (2013) deu visibilidade a importantes debates epistemológicos, metodológicos e ontológicos acerca das mudanças de paradigma na ciência.

As radicais mudanças nas metodologias de investigação e as descontinuidades conceituais e semânticas (estas últimas ligadas à referência às entidades teóricas postuladas no interior de uma rede teórica de uma dada disciplina) são aspectos da natureza da ciência que merecem um exame cuidadoso e pormenorizado. O fato de o estatuto ontológico das entidades teóricas e os conteúdos de verdade de uma teoria científica estarem, em alguma medida, sob constante suspeição<sup>4</sup> torna relevantes certos esclarecimentos para que não se coloque em extrema suspeição a confiança na ciência: como saber se uma teoria atingiu, em algum nível, conclusões verdadeiras sobre o mundo natural? Admitindo a existência de períodos revolucionários na ciência, é possível atribuir algum sentido ao progresso científico? Há alguma espécie de acumulação do conhecimento sobre a natureza? Se o abandono de entidades teóricas é recorrente na história da ciência – como foi o caso do flogisto, das esferas cristalinas da astronomia ptolomaica; dos éteres luminíferos e eletromagnéticos, entre muitos outros exemplos presentes em Laudan (1981) –, que conclusões tiramos acerca da dimensão ontológica das teorias científicas atuais? Há, de fato, relações sólidas entre teoria e realidade, como defendem os partidários do realismo científico? Tanto a relevância dessas questões, quanto a importância histórica de episódios revolucionários na ciência justificam a inserção deste tema no ensino básico e na formação de professores para a consolidação do ensino histórico e filosoficamente instruído das ciências naturais. Em outras palavras, buscamos fazer um exercício de qualificação dos processos de mudanças científicas profundas e a metodologia adotada para tal se dará por meio de uma epistemologia histórica.

Ao longo deste artigo, versaremos sobre um episódio histórico ligado a um caso exemplar de mudança científica e de descontinuidade no âmbito das entidades inobserváveis postuladas por uma teoria, a saber, o emprego e posterior abandono da noção do éter luminífero. O recorrente abandono de entidades teóricas ao longo da história da física, e das ciências de maneira geral, não raro é utilizado como um argumento crítico ao realismo científico, isto é, a posição filosófica que defende que a imagem de mundo expressa pela ciência reflete, mesmo que de maneira indireta, uma realidade do mundo natural que existe independentemente de nosso conhecimento sobre ela. Este argumento contra o realismo científico, chamado na literatura de

4 Referência ao chamado argumento da metaindução pessimista, sistematizado por Laudan (1981).

metaindução pessimista (Laudan, 1981), sugere que as entidades das teorias atuais da ciência estão tão sujeitas ao abandono quanto às entidades centrais das teorias do passado, o que pode soar como um desafio à confiança na ciência.

Apesar de o realismo de entidades ser defendido por importantes filósofos da ciência (Hacking, 1983; Bunge, 2010), e alguns não considerarem que a metaindução pessimista ofereça graves ameaças a formas críticas de realismo (Psillos, 1999), outros autores buscaram assimilar a metaindução pessimista a visões realistas, devido às suas importantes contribuições para uma apreciação filosófica do significado das entidades teóricas. Torna-se comum a defesa de formas mais seletivas de realismo. Uma dessas, que ganhou bastante atenção na literatura especializada, foi o chamado realismo estrutural, proposto por John Worrall (1989), resgatando importantes aspectos da filosofia de Henri Poincaré (1984, 1995).

Em suma, o realismo estrutural, tal como defendido por Worrall, esvazia a carga de realidade atribuída às entidades teóricas, considerando sua referência semântica sempre provisória e putativa. Em contrapartida, defende que o conhecimento fornecido pela ciência não reside no conhecimento das *coisas em si*, mas no conhecimento das *relações entre as coisas*.<sup>5</sup> O realismo estrutural prioriza o conhecimento sobre como os termos teóricos se interconectam em uma rede conceitual e formal. Admite-se que a ciência é capaz de realizar sistematizações verdadeiras, ou aproximadamente verdadeiras, porém não a respeito da natureza íntima das coisas, mas sim sobre a estrutura subjacente ao mundo natural, com o intuito de mapear essa estrutura.<sup>6</sup> Assim, a referência provisória a entidades inobserváveis não minaria um posicionamento otimista sobre a capacidade de apreensão da realidade concreta pela ciência, isto é, uma posição realista. Isso se justifica pelo fato de a firmeza da ciência não estar ligada à construção de representações que convirjam para um retrato cada vez mais acusado dos objetos que formam o mundo, mas sim pelo fato de as teorias serem bem-sucedidas em tecer cada vez mais relações verdadeiras entre os objetos, estes últimos permanecendo para sempre ocultos perante nosso conhecimento (Poincaré, 1995). A provisoriade das referências às entidades teóricas seria contraposta à permanência das relações formais tecidas nas teorias do passado. Fazendo menção às diversas dimensões do realismo científicos expostas por Niiniluoto (1999) (ontológico, epistemológico, metodológico, axiológico), podemos afirmar que o realismo estrutural se compromete com a dimensão epistemológica em detrimento da dimensão ontológica.

Consideramos que o episódio histórico a ser exposto a seguir é um estudo de caso no qual se pode identificar a retenção estrutural que se dá por meio de importantes mudanças científicas que envolvem, inclusive, o abandono de uma entidade inobservável, o éter, considerada central para a física do século XIX. Faremos uma apreciação de cunho histórico-epistemológico acerca do elo estrutural que se estabelece entre os estudos da óptica dos corpos em movimento, mais especificamente a proposição do coeficiente de arrastamento parcial do éter por Fresnel (1818), e a teoria da relatividade restrita.

Objetivamos mostrar que estudos de casos em epistemologia histórica têm o potencial de contribuir com o debate educacional ao trazer questões de natureza da ciência relevantes em

5 Este é o principal aspecto do realismo de Worrall que remete à epistemologia de Poincaré, o que sugere também um certo sabor kantiano à argumentação. Para saber mais sobre as relações entre o realismo estrutural epistêmico e a filosofia da ciência de Poincaré, ver Brading e Crull (2017) e Psillos (2014).

6 Estrutura sendo entendida aqui como as relações formais entre os termos que ocorrem em uma teoria altamente matematizada. Os termos teóricos estariam, portanto, conectados em uma grande rede de relações estruturantes que conferem sentido ao sistema teórico (Pereira, 2021).

relação aos desafios impostos pela contemporaneidade, principalmente no que se refere à reafirmação do valor epistêmico da ciência, buscando formar discursos metacientíficos que se localizam na tensão entre concepções criticamente realistas e relativistas do ponto de vista ontológico.

## O coeficiente de arrastamento parcial do éter de Fresnel e sua reinterpretação relativística

### *Controvérsias sobre a óptica dos corpos em movimento: a aberração estelar e o experimento do prisma de Arago*

Como já antecipado, as pesquisas em óptica dos corpos em movimento estavam associadas à detecção do movimento absoluto da Terra, problema posto pela Revolução Copernicana ao afirmar o movimento do planeta. À época, considerava-se que o melhor candidato a fenômeno óptico e astronômico capaz de fazê-lo seria a paralaxe estelar, que consiste na mudança aparente da posição das estrelas ao longo do ano devido à mudança de posição do planeta.

Com a intenção de observar tal mudança aparente, o astrônomo inglês James Bradley tentava detectar o efeito na estrela  $\gamma$  *Draconis* entre os anos de 1725 e 1726. Surpreendentemente, o movimento observado se dava na direção perpendicular ao plano da órbita terrestre, o que não poderia ser explicado pela paralaxe anual da estrela, configurando um novo tipo movimento anual das estrelas, até então desconhecido (Whittaker, 1951).

No ano seguinte, em 1727, Bradley continuou suas observações, desta vez com uma variedade de estrelas, constatando que as estrelas percorriam deslocamentos aparentes comuns a todas elas, não deixando dúvidas de que possuíam a mesma causa. Para explicá-los, apoiou-se na hipótese de que a velocidade com a qual a luz se propaga ao longo do espaço entre a estrela e o observador tem um valor finito. O fenômeno observado entre os anos 1725 e 1727 seria explicado pela combinação do movimento orbital anual da Terra com o movimento da luz. Segundo a teoria de Bradley, a mudança sistemática da posição aparente das estrelas seria causada pela constante mudança de velocidade relativa entre o observador e a luz emitida pelo corpo celeste. Desta maneira, tal teoria exige não apenas a hipótese da velocidade finita da luz, mas também assume que a Terra não pode estar parada, nem em movimento retilíneo uniforme, mas em movimento orbital em que seu vetor velocidade tem seu sentido e direção constantemente alterados. Caso a Terra tivesse movimento retilíneo uniforme, este fenômeno jamais teria sido detectado (Poincaré, 2008). A paralaxe estelar, por outro lado, é causada pela mudança da posição da Terra, e não de sua velocidade.<sup>7</sup>

Com esta teoria, Bradley foi capaz de deduzir o ângulo de aberração partindo de suas observações. Utilizando o desvio máximo das estrelas em relação ao pólo da eclíptica, Bradley deduziu a razão entre a velocidade da luz emitida pelas estrelas e a velocidade orbital da Terra:

Conhecendo a maior alteração da posição da estrela no polo da eclíptica (cujo efeito equivale à proporção entre a velocidade da luz e a da Terra em movimento orbital) não será difícil encontrar qual será a diferença, baseada nesta explicação, entre a posição verdadeira e

7 Para mais detalhes a respeito das diferenças entre a aberração estelar e a paralaxe, bem como representações esquemáticas, ver Pietrocola (1993) e Janssen e Stachel (2013).

aparente de qualquer outra estrela em qualquer instante; e [...] sendo dada a diferença entre a posição real e aparente, a proporção entre a velocidade da luz e a da Terra em movimento orbital pode ser encontrada (Bradley citado em Sarton, 1931, p. 253; tradução nossa).

A princípio, a explicação de Bradley era consistente com a teoria emissionista da luz, tendo sido interpretada como uma prova da sua natureza corpuscular (Darrigol, 2012, p. 129). Ele imaginou a luz da estrela sendo observada por um tubo estreito e sugeriu que a partícula de luz só poderia alcançar o olho do observador, sem que encontrasse as paredes do tubo, caso este fosse inclinado em um certo ângulo em relação à posição real da estrela. Este ângulo passou a ser chamado de ângulo de aberração da luz.

Uma indução curiosa obtida pelo astrônomo foi a constância deste ângulo para todas as estrelas observadas, que sugeria que a velocidade da luz assumiria também sempre um valor constante, conclusão incompatível com a teoria corpuscular de origens newtonianas, que previa a adição de velocidades entre o observador e um corpúsculo de luz emitido por uma fonte. Tal inconsistência atravessou o século XVIII, e foi interpretada como uma questão de interesse pela ciência francesa, à época liderada por Pierre Simon Laplace, e foi investigada em detalhes por François Arago no início do século XIX (Pietrocola, 1995).

Tendo a óptica corpuscular newtoniana como ponto de partida, que previa que o desvio da luz causado pela refração dependia da velocidade relativa entre o raio de luz e o dióptro, Arago pretendia vincular o ângulo de refração com a velocidade da luz em relação à Terra. No dia 10 de dezembro de 1810, Arago leu à Primeira Classe do Instituto Nacional de Ciências e de Artes sua *Mémoire sur la vitesse de la lumière*, descrevendo a realização e resultados de seu experimento em que mediu o desvio sofrido pela luz de uma mesma estrela em um prisma em duas situações distintas: em uma o prisma, carregado pelo movimento da Terra, se deslocava no sentido contrário ao movimento da luz; na outra situação, o prisma se deslocava no mesmo sentido da propagação da luz, gerando, em tese, duas velocidades relativas diferentes entre o prisma e os raios de luz da estrela observada. O objetivo do experimento era constatar se havia desigualdades no desvio causado pela refração em cada um dos casos, como prescrevia a óptica newtoniana.

Foram observados os desvios da luz da mesma estrela às 6 horas da manhã e às 6 horas da tarde. O vetor velocidade da Terra no primeiro caso seria antiparalelo ao segundo, resultando comparativamente que a diferença de velocidade relativa entre o prisma e os raios de luz seria de duas vezes a velocidade linear de rotação da Terra. Como era sabido à época, esta última seria igual a aproximadamente 1/10000 da velocidade da luz, então a diferença esperada entre a velocidade de luz às 6 da manhã e as 6 da tarde seria uma fração de 1/5000 de  $c$ . Segundo os cálculos de Arago,<sup>8</sup> a velocidade da Terra causaria uma mudança de desvio de 6", então o desvio total entre as duas medidas (equivalente a velocidade de  $c/5000$ ) geraria um desvio de 12" (Arago, 1853 [1810], p. 46), diferença compatível com a precisão de seus instrumentos. Arago constatou que todos os raios de luz foram sujeitos ao mesmo desvio angular, sugerindo, assim como as observações de Bradley, que quaisquer raios de luz se apresentariam sempre com a mesma velocidade, um resultado em "contradição manifesta com a teoria newtoniana" (p. 46).

Até agora, os fenômenos referentes à óptica dos corpos em movimento e à constância da velocidade da luz foram tratados apenas segundo a teoria corpuscular da luz, a visão

8 Implicitos em sua *Mémoire*, mas explicitados em Pedersen (2000, p. 539-540).

predominante na ciência ocidental daquela época. Veremos em seguida como as emergentes teorias ondulatórias lidavam com estes problemas tão controversos, e como os modelos de éter em conjunção com a teoria ondulatória conseguiam gerar frutos e mostrar-se, em certa medida, à altura dos desafios que a natureza impunha a esses sistemas teóricos.

### ***As teorias do movimento do éter de Young e de Stokes para a aberração estelar***

Em 1804 foi publicado nas *Philosophical Transactions* o trabalho *Experiments and calculations relative to physical optics*, de Thomas Young, tratando dos efeitos de interferência e difração, manifestamente contrários à teoria emissionista, favorecendo uma visão ondulatória em analogia com o som. Na quarta seção desse artigo, intitulada *Argumentative inference respecting the nature of light*, Young defende que a aberração estelar seria explicada pelo movimento livre e sem resistência que o éter realizaria através dos corpos materiais (Young, 1804). O que configurava um desafio para a concepção emissionista da óptica, em que o movimento relativo entre a fonte luminosa e o observador era determinante para a explicação da aberração, se tornava um efeito simples quando se concebia a luz como vibrações em um meio onde essa se propaga, “já que numa visão ondulatória a velocidade de propagação da luz não depende da fonte emissora, mas simplesmente do meio no qual a perturbação propaga-se” (Pietrocola, 1993, p. 164). Segundo essa perspectiva, a constância de ângulo de aberração era uma consequência natural de seus princípios, mas contava com uma importante assumpção sobre a interação do éter com a matéria: o éter seria um meio tão rarefeito e composto de partículas tão sutis e diminutas, que seria transparente à matéria. A passagem de matéria ordinária pelo éter não o perturbaria, nem o arrastaria, permanecendo sempre imóvel.

Entretanto, esta teoria não era compatível com o experimento de Arago de 1810. A concepção ondulatória da óptica requeria propriedades incompatíveis para explicar por um lado a aberração e por outro a refração. A igualdade dos ângulos de refração e a consequente constância da velocidade de luz constatadas por Arago exigiam que a Terra imprimisse integralmente seu movimento ao éter ao seu redor, como uma espécie de “atmosfera do éter” que fosse por ela carregado, estando sempre em repouso em relação ao planeta, explicando os resultados observados com os experimentos dos prismas (Pedersen, 2000).

Na década de 1840, o britânico George Stokes propõe uma teoria de éter em que este era totalmente arrastado pelo movimento planetário. Desde que a estrutura das ondas luminosas fora estabelecida pelos trabalhos de Fresnel, entre as décadas de 1810 e 1820, sua teoria ganhava cada vez mais aceitação (Frankel, 1976). Ela se tornou uma das principais questões da física teórica ao estabelecer modelos mecânicos da estrutura do éter que pudessem produzir todos os fenômenos ópticos explicados pela teoria fresneliana (Wilson, 1972). Uma das características mais notáveis desta teoria era o fato de conceber apenas vibrações transversais para a propagação da luz, o que levou os físicos, dentre eles Stokes, a formularem modelos de sólidos elásticos para o éter, pois apenas sólidos são capazes de produzir vibrações transversais e polarização (Einstein, 2007).

Stokes, muito inspirado pelos estudos sobre a interação entre sólidos em movimento em meios fluidos e sobre a viscosidade, julgava implausível uma teoria de éter imóvel. Por se tratar de um meio mecânico, Stokes considerava que o éter imprimiria sua viscosidade nos astros que o atravessavam, de forma que o movimento de translação da Terra carregaria consigo uma

espécie de casca esférica de éter que estaria em repouso em relação ao planeta (Wilson, 1972). Como esta porção de éter e a Terra compartilhariam do mesmo estado de movimento, isso explicaria os efeitos nulos dos experimentos de Arago de 1810.

Por outro lado, a aberração estelar ganha uma explicação mais complicada, e de certa forma mais artificial do que a explicação que provinha das teorias de éter estático. À semelhança do que ocorre na interação entre sólidos que se movem em meios resistivos, o arrastamento de éter estava sujeito a certas restrições: em pontos muito próximos da superfície da Terra, o éter compartilhava totalmente seu movimento, mas a distâncias não muito grandes a velocidade do éter era zero em relação à Terra, e no espaço compreendido entre estas duas regiões sua velocidade era gradualmente alterada. Se tratando da aberração das estrelas, o ângulo constante era causado pela gradual mudança de orientação das frentes de ondas ao penetrarem na região em que a velocidade do éter aumentava. O ângulo seria definido por uma linha ortogonal à frente de onda que chega à superfície da Terra em repouso com respeito à porção de éter que nela se encontra (Wilson, 1972, p. 64-65).

Em suma, o éter arrastado de Stokes era capaz de explicar todos os fenômenos referentes à óptica dos corpos em movimento, alguns com mais facilidade do que o éter imóvel (refração referente aos experimentos de Arago), outros com mais dificuldade (aberração estelar), prevendo que nenhum experimento óptico realizado na Terra seria capaz de evidenciar o movimento relativo do éter.

### ***O coeficiente de Fresnel e o éter parcialmente arrastado***

Nesta seção vamos analisar a teoria do éter parcialmente arrastado, presente na carta de Augustin Jean Fresnel à Arago publicada na *Annales de Chimie et de Physique*, em setembro de 1818. Nela é proposta uma teoria da interação entre o éter e a matéria que explicava tanto a aberração estelar quanto a refração em corpos em movimento seguindo a noção ondulatória da luz. Anos após a realização de suas observações, Arago consultou Fresnel sobre a possibilidade de explicar tais resultados utilizando uma teoria ondulatória, resultando neste trabalho, editado para publicação pelo próprio Arago (Martins, 2012).

Para além da hipótese da existência de um meio extremamente sutil e imponderável que daria suporte às vibrações luminosas, Fresnel utiliza também outra hipótese já sugerida por Young, segundo a qual a densidade de éter dentro dos corpos ponderáveis é maior do que no vácuo. Segundo Young, o “poder de refração dos corpos transparentes depende da concentração de éter dentro deles, tornando-a mais precisa ao assumir que a densidade de éter em qualquer corpo é proporcional ao quadrado do índice de refração” (Whittaker, 1951, p. 109). Em notação moderna, esta relação é expressa pela equação  $\rho' = n^2\rho$ , onde  $\rho'$  é a densidade de éter dentro de um corpo transparente de índice de refração  $n$ , e  $\rho$  seria a densidade de éter no vácuo. Esta dependência quadrática foi herdada dos trabalhos de Young e suas analogias com o som, em que a velocidade as ondas sonoras é dada por  $\sqrt{T/\rho}$ , onde  $T$  é a tensão do meio e  $\rho$  sua densidade. Como Fresnel supôs que o meio prismático está em equilíbrio de tensão com o éter ao redor, então a velocidade  $c/n$  é proporcional a  $\sqrt{\rho}^{-1}$  justificando a relação entre as densidades do éter dentro e fora do corpo transparente. A fração arrastada do éter corresponderia apenas ao excesso deste que o corpo transparente carrega em relação à densidade

de éter no ar, ou seja, a diferença entre a densidade dentro e fora do corpo (Whittaker, 1951):  $\rho_a = \rho' - \rho = (n^2 - 1)\rho$ . Sendo assim, a velocidade da luz dentro de um corpo transparente em movimento é “acrescida/diminuída por um fator baseado na quantidade de éter arrastada pelo meio” (Pietrocola, 1993). Caso todo o éter fosse arrastado, a velocidade da luz seria acrescida de  $v$  (velocidade de corpo transparente em relação ao referencial do éter parado), mas como apenas uma determinada parcela do éter é arrastada, a velocidade da luz é acrescida de um fator  $f = \frac{n^2 - 1}{n^2} = 1 - \frac{1}{n^2}$  resultando na velocidade da luz no meio transparente no referencial absoluto igual a  $c' = \frac{c}{n} + (1 - \frac{1}{n^2})v$ . Esta equação deixa claro como o arraste parcial do éter interfere na velocidade de propagação da luz, mas, além disso, esta teoria nos informa sobre o estado de movimento relativo entre um corpo transparente e o vento de éter em seu interior.

Fresnel emprega o mecanismo teórico e sua estrutura matemática para lidar com o problema do prisma de Arago.<sup>9</sup> Suponha um referencial  $S$  em repouso absoluto junto ao éter e um referencial  $S'$  em repouso em relação a um bloco de vidro com velocidade  $v$  em relação a  $S$ . Em uma teoria em que o éter não adquire nenhum tipo de movimento, o vento de éter teria velocidade  $-v$  dentro do bloco. Já em uma teoria em que o éter é totalmente arrastado pelo bloco (caso em que  $f = 1$ ) a velocidade relativa entre o corpo e o meio dentro dele seria igual a zero. Entretanto, Fresnel mostrou que com o arrastamento parcial, a velocidade do vento de éter dentro do bloco seria igual à  $\frac{-v}{n^2}$  (Newburg, 1974). Desta maneira, pode-se interpretar que qualquer arraste do éter corresponde a um freamento do vento deste, o que, em analogia com o som, altera a velocidade da onda que nele se propaga.

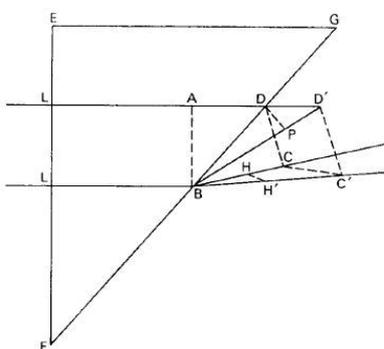


Figura 1: Representação do prisma de Arago. Extraído de Fresnel (1863 [1818]).

Continuando sua interpretação do experimento de Arago, Fresnel considerou o prisma EFG, representado na Figura 1, em que os raios  $L$  incidem perpendicularmente na face  $EF$  – havendo refração apenas na face  $FG$  – de forma que  $LB$  e  $LD$  representam a saída dos raios de luz no caso em que o prisma está em repouso junto ao éter. Nesta situação o raio  $LB$  toma a direção  $BC$  ao ser refratado. As linhas pontilhadas  $AB$  e  $DC$  representam as frentes de ondas dentro e fora do prisma, respectivamente, e chamaremos o ângulo entre elas de  $\delta$ . Entretanto, no caso em que

9 Para exposições mais completas deste e outros problemas no qual o coeficiente de Fresnel pode ser empregado, ver Pedersen (2000) e Menezes e Lordêlo (2019).

o prisma se movimenta em relação ao éter, os deslocamentos dos raios de luz LD e LB aumentam, alterando o ângulo de refração. Assim, o ponto D é deslocado até o ponto D', o raio que emerge em B toma a direção BC', e a frente de onda é dada por D'C', de maneira que o tempo que o raio levou para percorrer AD' é o mesmo para percorrer BC'. Seguindo a reconstrução de Pedersen (2000), chamaremos de  $\delta_1 = r - 1$  o ângulo formado entre as frentes de onda AB e D'C', onde  $r$  e  $i$  são, respectivamente, os ângulos de refração e incidência do raio LBC'.

A velocidade da luz dentro do prisma em movimento no referencial absoluto é dada pela equação  $c' = \frac{c}{n} + (1 - \frac{1}{n^2})v$ , e no referencial do prisma é dada por  $\frac{c}{n} + (1 - \frac{1}{n^2})v - v$  por causa do vento de éter experimentado pelo prisma. Agora, a velocidade do raio refratado neste mesmo referencial é igual  $c - v \cos(\delta_1)$ , ou seja, a projeção de  $v$  na reta BC'. Utilizando a lei de Snell para a teoria ondulatória desprezando termos de ordem superior a 1 de  $v/c$  obteremos

$$\frac{\text{sen } r}{\text{sen } i} \approx n - \frac{nv}{c} \cos \delta_1 + \frac{v}{c}$$

Se considerarmos  $v = 0$ , ou seja, caso em que o prisma está em repouso absoluto, retomamos a lei de Snell que conhecemos. Isso significa que a teoria de Fresnel produz ângulos de refração diferentes para cada referencial, dependendo então de  $v$  como já havia ficado claro ao fazermos a distinção entre os desvios  $\delta$  e  $\delta_1$ , cuja diferença é dada por  $\alpha = \delta - \delta_1 \approx \frac{v}{c} \text{sen } \delta$ .

Entretanto, o observador na Terra não vê o raio refratado na direção BC', uma vez que este se move através do éter com a mesma velocidade do prisma, fazendo com que a velocidade aparente do raio BC' seja subtraída de  $v$ . Em outras palavras, o observador na Terra verá o raio BC' inclinado por um ângulo  $\alpha$ , causado pela aberração da estrela observada. Assim, Fresnel mostrou que, partindo do arraste parcial do éter, o efeito de aberração cancela o efeito causado pelo movimento do prisma, fazendo com que o ângulo de refração aparente se tornasse invariante mediante mudanças de referenciais. Desta forma, a diferença na refração da luz, perseguida por Arago, realmente ocorreria, porém seria um efeito inobservável no referencial da Terra.

Com a hipótese do arrastamento parcial do éter, Fresnel conciliou os fenômenos de aberração com os experimentos de Arago de 1810, mostrando que no segundo há efeitos que se anulam de modo que não seria possível acusar o movimento da Terra através do éter em primeira aproximação de  $v/c$  (Martins, 2012). Além de ter obtido o fator teórico que tornava o sistema ondulatório coerente com as observações, Fresnel foi capaz de proporcionar uma interpretação mecânica para o efeito de arraste, uma vez que partia de suposições sobre a densidade do éter nos corpos e a transmissão do movimento deste ao éter. Desta forma, podemos interpretar a teoria de Fresnel como uma concepção que tentava preservar uma harmonia com a visão mecânica de mundo, não apenas introduzindo uma hipótese *ad hoc* sem qualquer interpretação física subjacente (Cassini e Levinas, 2018).

Veremos mais adiante algumas consequências contraditórias da teoria do arrastamento parcial que tornavam sua interpretação pouco convincente. Mas, independentemente disso, Fresnel foi bem-sucedido em tecer as relações corretas entre a velocidade da luz e a velocidade do meio transparente no qual ela se propaga, tendo o coeficiente de arrastamento parcial como elo estruturante entre as duas grandezas.

### Confirmações experimentais do coeficiente de Fresnel

O coeficiente de arraste foi obtido e confirmado diversas vezes ao longo do século XIX, mas o experimento mais famoso que alegou a validade da fórmula de Fresnel (eq. 4) em aproximações de primeira ordem de  $v/c$  foi o experimento realizado por Hippolyte Fizeau em 1851. Utilizando um método de interferência da luz, Fizeau mediu a velocidade da luz que se propagava contra e a favor a uma corrente de água em tubo em U, medindo diferenças compatíveis com a teoria de Fresnel entre as duas situações. A importância deste experimento para a história da óptica dos corpos em movimento em relação aos outros já tratados neste trabalho reside no fato de que foi uma verificação positiva do coeficiente de arraste, ao invés de um experimento de resultado nulo, como o experimento de Arago (Menezes e Lordêlo, 2019). O experimento buscava determinar de que maneira o movimento da corrente de água interfere na velocidade de propagação da luz em seu interior. À época, havia três hipóteses: a inexistência de arraste (teoria de Young); o arraste total (Stokes); o arraste parcial (Fresnel).

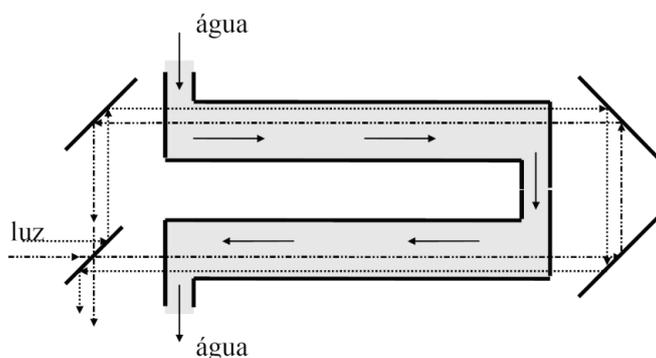


Figura 2: Representação esquemática do aparato de Fizeau. Extraído de Martins (2015).

Segundo Martins (2015), Fizeau não publicou imagens ou desenhos da aparelhagem, mas suas descrições se assemelham ao aparato experimental ilustrado na Figura 2. Ele funcionava da seguinte maneira: uma fonte emitia luz que incidia em um espelho semi-refletor (canto inferior esquerdo, na Figura 2) que dividia os raios de luz, refletindo uma parte e transmitindo outra. A parte transmitida se dirigia para dentro do tubo, viajando contra a corrente. Ao sair do tubo, o raio de luz refletia duas vezes em espelhos posicionados de maneira a fazê-lo voltar ao tubo com água, continuando sua propagação no sentido contrário ao fluxo de água. Já a parte refletida incidia em outro espelho que a desviava para dentro do tubo, fazendo percorrer sua extensão no mesmo sentido da corrente. Após percorrerem suas trajetórias, os raios eram recombinados para que a interferência entre eles fosse acusada pelo interferômetro. O padrão de interferência, causado pela diferença de caminho óptico, obtido por Fizeau, permitiu a obtenção experimental indireta do coeficiente de Fresnel de  $f_{exp} = 0,48$ , sendo o valor teórico calculado como  $f_{calc} = 0,43$ . Tal resultado experimental se adequava ao teórico dentro das incertezas (French, 1968).

O resultado do experimento de Fizeau, ao confirmar positivamente o coeficiente de Fresnel, tornou-se uma pedra angular nos debates sobre a óptica dos corpos em movimento, aumentando o interesse dos pesquisadores sobre o assunto (Hirosige, 1976). Nenhuma outra teoria do éter, como a de Stokes, conformava-se com esses resultados, tornando o uso do coeficiente inevitável.

Entretanto, o mecanismo imaginado por Fresnel, que envolvia o arrastamento do excesso de éter dentro do corpo em relação ao éter no espaço livre, era pouco convincente e levava a conclusões duvidosas, como apontou Wilhelm Veltmann em 1870 (Stachel, 2005a). Como o arraste dependia do índice de refração, o coeficiente deveria ser aplicado para cada cor da luz, uma vez que cada uma possui um comprimento de onda diferente. Isto levava a uma conclusão de que o éter seria arrastado em diferentes taxas dependendo da frequência da onda luminosa, contradizendo a assumpção de que o coeficiente emergia de propriedades de interação entre o éter e a matéria. Consequentemente, caso um experimento, como o de Fizeau, fosse realizado simultaneamente com raios de luz de duas cores diferentes, o éter se moveria com duas velocidades distintas ao mesmo tempo (Cassini e Levinas, 2018). Veltmann, partindo dos fenômenos de aberração (Martins, 2012), chega a afirmar: "As considerações por meio das quais Fresnel tentou dar fundamentos físicos [à sua fórmula] são desprovidas de valor" (Veltmann, 1873, citado em Stachel, 2005a), interpretando-a não como um fator de compensação de efeitos ópticos utilizado em problemas isolados, mas como uma condição suficiente e necessária para a aplicação das leis de refração para raios em meios em repouso ou em movimento.

Entre 1872 e 1874, Éleuthère Mascart<sup>10</sup> realizou o mais completo trabalho sobre a óptica dos corpos em movimento até então, fazendo uma série de experimentos que confirmaram a ausência de efeitos observáveis do movimento da Terra. Tal contribuição foi agraciada com o Grande Prêmio da Academia de Ciências de Paris de 1873, oferecido ao melhor trabalho experimental sobre modificações na propagação e nas propriedades da luz em consequência do movimento entre fonte luminosa e observador (Hirosige, 1976, p. 20). Um dos experimentos de resultado nulo por ele conduzidos comparou por métodos interferométricos o tempo em que dois raios de luz demoravam para percorrer, em sentidos opostos, a extensão de um corpo transparente. Em outras palavras, cada raio de luz se propaga em sentidos opostos do vento de éter, um a favor e outro contra. Tal resultado levou Mascart a obter o coeficiente de arraste (Newburg, 1974), endossando a confiança na fórmula proposta por Fresnel.

No mesmo ano de 1874, Alfred Portier publicou uma análise teórica que complementava os trabalhos de Mascart e Veltmann, combinando a teoria de Fresnel com o princípio de Fermat, provando a impossibilidade de se detectar movimentos absolutos via experimentos ópticos (Newburg, 1974). O experimento de Fizeau impôs, pelo menos aos cientistas continentais, a validade empírica da fórmula de Fresnel para a velocidade da luz em meios em movimento, sendo mais tarde assimilado de maneira mais geral ao corpo teórico da óptica física pelos trabalhos de Veltmann, Portier e Mascart. Apesar da crescente confiança em sua formulação, estas mesmas análises evidenciaram as contradições da interpretação física original e do arrastamento real do éter (Stachel, 2005a).

### ***A reinterpretação relativística do coeficiente de Fresnel***

Com o advento da teoria eletromagnética e da unificação entre o eletromagnetismo e a óptica, iniciada por Maxwell (Hunt, 2015), os fenômenos óticos passaram a ser investigados dentro de seu quadro teórico. Não foi diferente para os fenômenos da óptica dos corpos em movimento, de forma que uma teoria para a eletrodinâmica dos corpos em movimento deveria ser capaz de obter o coeficiente de arrastamento parcial do éter de Fresnel.

10 Para as contribuições de Mascart à óptica dos corpos em movimento, ver Pietrocola (1992).

A ausência de efeitos ópticos que denunciasses o movimento da Terra em relação ao referencial do éter foi retomada e tornada inteligível pela teoria dos elétrons de Lorentz<sup>11</sup> ao introduzir um conjunto de transformações de coordenadas que mantinham invariantes as equações de Maxwell no vácuo. Estas transformações, no entanto, eram empregadas apenas como uma ferramenta de cálculo que estabelece correspondências entre sistemas em movimento e sistemas estacionários (Stachel, 2005b). Podemos dizer que as transformações de Lorentz, assim batizadas por Poincaré (Stachel, 2005b), só receberam uma interpretação física profunda e deduzida via princípios físicos fundamentais com o trabalho sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento de Einstein, em 1905. Esta interpretação relativística das transformações de Lorentz pavimentou o caminho para a reinterpretação do coeficiente de Fresnel, como mostraremos a seguir.

Desde jovem Einstein nutria particular interesse pela eletrodinâmica, tendo formulado aos 16 anos sua primeira experiência de pensamento, na qual imaginou um observador que acompanha um raio de luz, estando assim em repouso um em relação ao outro. Einstein pensou o que este observador “enxergaria” nesta situação, chegando a uma estranha contradição: seria observado um pulso imóvel de luz, uma ondulação estacionária sem propagação, ou seja, algo fisicamente inexistente (Paty, 2008, p. 51). Em seu primeiro artigo sobre a relatividade, nos é apresentada em sua introdução outra experiência de pensamento, diretamente ligada à eletrodinâmica dos corpos em movimento, na qual considerava a relatividade do movimento de uma espira metálica e um ímã, nos chamando atenção para o que ele considerava uma “assimetria” gerada pela teoria de Maxwell:

Como é bem conhecido, a eletrodinâmica de Maxwell [...], quando aplicada a corpos em movimento, produz uma assimetria que não parece ser inerente aos fenômenos. Considere-se, por exemplo, a interação eletrodinâmica entre um ímã em um condutor. O fenômeno observável, aqui, depende apenas do movimento relativo entre o condutor e o ímã, ao passo que o ponto de vista usual faz uma distinção clara entre os dois casos, nos quais um ou outro dos dois corpos está em movimento. Pois, se o ímã está em movimento e o condutor está em repouso, surge, nas vizinhanças do ímã, um campo elétrico com um valor definido de energia que produz uma corrente onde quer que estejam localizadas partes do condutor. Se o ímã, contudo, estiver em repouso, enquanto o condutor se move, não surge qualquer campo elétrico na vizinhança do ímã, mas, sim, uma força eletromotriz no condutor, que não corresponde a nenhuma energia *per se*, mas que, supondo uma igualdade do movimento relativo, nos dois casos, dá origem a correntes elétricas de mesma magnitude e sentido que as produzidas no primeiro caso pelas forças elétricas (Einstein, 1905, citado em Stachel, 2005b, p. 143).

A assimetria que Einstein se refere consiste na inadmissível – segundo sua forma de pensamento – distinção entre as explicações usadas para o caso em que se atribui repouso absoluto

11 Esta teoria não será tratada aqui, mas consiste em um programa de pesquisa que buscava derivar os fenômenos ópticos e eletromagnéticos apenas por via da interação entre os campos eletromagnéticos (na época interpretados como funções de estado do éter), e cargas componentes da matéria, chamadas de elétrons. No caso dos fenômenos que envolviam o movimento de dielétricos (entre eles os corpos transparentes), era necessário obter um conjunto de transformações que mantivessem as equações do eletromagnetismo invariantes, o que justificava o desenvolvimento de um conjunto de transformações para esses campos, as transformações de Lorentz (McCormmach, 1970; Hirose 1969). Para saber mais sobre a teoria dos elétrons de Lorentz e a retenção do coeficiente de Fresnel, ver Pereira (2021).

ao ímã, por um lado, e ao condutor, por outro, mesmo que não haja contrapartida empírica para que se decida qual dos dois fenômenos está realmente acontecendo. Em seguida argumenta que, assim como os fenômenos da mecânica, não existem nos fenômenos da eletrodinâmica quaisquer propriedades que correspondam ao repouso absoluto. Esse tipo de fenômeno, somado à ausência da anisotropia terrestre acusada por vários experimentos mencionados anteriormente, levaram-no a estender o princípio da relatividade da mecânica para a óptica e para a eletrodinâmica, tornando-se o primeiro princípio fundamental de sua teoria, chamando-o de "princípio da relatividade". Einstein enfatiza que o princípio da relatividade já havia sido demonstrado para fenômenos eletromagnéticos e ópticos de primeira ordem, ou seja, aqueles que dependem do coeficiente de Fresnel.

Durante sua formação, Einstein tivera apenas contato com a eletrodinâmica de Hertz, que assumia o arrastamento total do éter por corpos em movimento, o que preservava o princípio da relatividade,<sup>12</sup> algo importante para seu estilo de pensamento, que buscava sempre refletir sobre os princípios gerais e a coerência interna de uma teoria física. Mas, entre os anos de 1901 e 1902, quando tomou conhecimento da teoria de Lorentz (que continha as hoje chamadas transformações de Lorentz, que produziam matematicamente o coeficiente de Fresnel), deu a ela preferência, pela vantagem de explicar diretamente o experimento de Fizeau e conter o coeficiente de arraste parcial do éter (Paty, 2008). Por um lado, esta escolha era vantajosa no sentido abranger mais fenômenos conhecidos, a saber, todos aqueles em que era imprescindível o emprego do coeficiente, mas por outro perdia elegância ao privilegiar o referencial absoluto de éter, se alienando do princípio da relatividade. A tarefa empreendida por Einstein foi a de tornar compatíveis os sistemas teóricos da mecânica e da eletrodinâmica, reformando ambas e reconceitualizando a visão de espaço e tempo.

Nesse sentido, o programa de pesquisa de Einstein se preocupava em eliminar as contradições entre os dois ramos da física, preservando de cada um deles aquilo que julgava inegociável (Paty, 2008): do lado da mecânica, buscava preservar o princípio da relatividade, cuja extensão já foi comentada; do lado da teoria de Maxwell, buscou preservar a constância da velocidade da luz, derivada diretamente de suas equações fundamentais. Este último configura o segundo princípio de sua teoria, a velocidade da luz assume sempre o mesmo valor no vácuo, independente do estado de movimento de sua fonte.

À primeira vista, estes dois princípios parecem incompatíveis, pois a velocidade da luz *deveria* ser diferente quando observada em diferentes referenciais ou em diferentes estados de movimentos: a contradição era encontrada na implícita aceitação universal da soma galileana de velocidades, regra na qual estão implícitas também as próprias noções newtonianas de espaço e tempo absolutos. Tais noções estão intimamente ligadas à ideia de ação instantânea à distância, que compunha o âmago da gravitação de Newton, conceito não admitido pelo eletromagnetismo de Faraday e Maxwell, cujas ações são sempre contíguas e mediadas pelo campo eletromagnético. Einstein buscou ressignificar a noção de velocidade mantendo uma teoria geral de campos, o que o levou a "interrogar-se em primeiro lugar sobre a noção de *simultaneidade*" (Paty, 2008, p. 59). Influenciado pelas concepções da mecânica relacional Mach e pela crítica do espaço e tempo absolutos de Poincaré, Einstein concluiu que a simultaneidade

12 Vale lembrar que a teoria de Fresnel não respeitava o princípio da relatividade, uma vez que gerava ângulos de refração distintos para o experimento de Arago caso fossem produzidos no referencial da Terra ou no referencial do éter.

absoluta deveria ser sacrificada, uma vez que sinais são sempre propagados com velocidade finita, devendo, portanto, ser relativa ao estado de movimento do observador. Ao se relativizar a noção de intervalos de tempo, a fim de manter absoluta a velocidade da luz, seria necessário, conseqüentemente, se relativizar a noção de distância. Einstein deduz estas novas concepções a partir dos dois princípios por ele postulados, obtendo as transformações de Lorentz (antes apenas assumidas de antemão). A partir destas transformações deduz também uma nova regra de adição de velocidades que eliminou a aparente contradição entre os dois princípios. Segundo a lei de Galileu, a composição  $u$  das velocidades de dois corpos, digamos, uma com velocidade  $w$  e outro com velocidade  $v$ , colineares entre si, é dada pela simples fórmula  $u = w + v$ . A nova regra impunha que qualquer que fosse o resultado da soma da velocidade de um referencial inercial com a velocidade da luz, este nunca excederia o valor  $c$ . Assim, a nova lei de soma de velocidades (já obtida anteriormente por Poincaré) toma a forma (Paty, 2008, p. 59-62):  $u = w / (1 + \frac{vw}{c^2})$ .

Uma das conseqüências deste novo sistema teórico é, como Einstein comentou explicitamente no início de seu artigo, o abandono do éter, entidade por ele interpretada como supérflua, uma vez que se eliminou a necessidade de um referencial privilegiado. É notável que o éter luminífero, talvez a entidade mais importante e protagonista da física teórica do século XIX e absolutamente necessária para uma visão mecânica do mundo, tornava-se obsoleta. Dessa maneira, a teoria de Einstein, eliminou as contradições entre os dois principais sistemas teóricos da física se baseando em apenas dois princípios postulados e sem a necessidade de hipóteses subsidiárias que marcava a óptica dos corpos em movimento desde a época de Fresnel.

O trabalho de Einstein, marcado pela radical reconceitualização de ideias solidificadas por mais de 300 anos de mecânica newtoniana, chamou a atenção, no mesmo ano de sua publicação, do renomado físico Max Planck, com quem passou a se corresponder para discutir aspectos e implicações de sua nova teoria. Nos anos subsequentes Planck “desenvolveu ainda mais as conseqüências do princípio da relatividade e provocou o interesse de seu assistente, Max von Laue” (Stachel, 2005b, p. 134-135), que desenvolveu uma série de artigos sobre o tema.

Dentre estes, aquele que nos interessa data de 1907, cuja tradução do título é “O arrastamento da luz por corpos em movimento de acordo com o princípio da relatividade” (*Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip*), no qual Laue deduziu o coeficiente de Fresnel diretamente da nova cinemática relativística (Laue, 1907). Para tal, Laue considera dois sistemas de coordenadas ( $S$  e  $S'$ ), um se movendo em direção ao outro com velocidade relativa  $v$ . Uma velocidade  $w$  que é observada por  $S$  se relaciona com a velocidade  $w'$  da seguinte maneira, segundo a adição de velocidades de Einstein-Poincaré:  $w = w' + v / (1 + \frac{vw'}{c^2})$ . Considerando que  $w'$  seja a velocidade com que a luz se propaga em um corpo transparente em movimento no mesmo referencial que  $S'$ , então  $w' = c/n$ . Substituindo na lei de adição temos:  $w = \frac{c}{n} + v / (1 + \frac{vc}{n^2})$ , em que  $w$  agora é igual à velocidade da luz dentro do corpo transparente medida pelo referencial  $S$ . Ao se aplicar a expansão de Taylor nesta equação e generalizar para o caso em que os dois sistemas podem se tanto se afastando quanto se aproximando, obtemos:  $w = \frac{c}{n} + (1 - \frac{1}{n^2})(\pm v - \frac{v^2}{cn} \pm \frac{v^3}{(cn)^2} - \frac{v^4}{(cn)^3} + \dots)$

Ao negligenciarmos os termos de ordem dois em diante, recaímos na velha fórmula de Fresnel para a velocidade da luz em um corpo transparente em movimento. Neste sucinto

artigo, Laue mostra que o coeficiente de Fresnel – quase 90 anos depois de sua proposição original – emerge naturalmente das novas relações entre o espaço e o tempo, estruturalmente ligadas na teoria da relatividade restrita. Ao fim do trabalho, Laue endossa o caráter agora supérfluo do éter concordando com Einstein ao dizer que o princípio da relatividade nos livra da necessidade de introduzir um éter óptico (Laue, 1907), uma vez que o coeficiente é deduzido sem fazer quaisquer suposições sobre o éter ou sobre sua interação com a matéria, sem quaisquer hipóteses sobre a estrutura da matéria, emergindo apenas das íntimas relações entre espaço e tempo. Esta dedução do coeficiente de Fresnel não pode ser tributária, portanto, de novas explicações dinâmicas de interação entre o éter e matéria, mas sim fruto de uma nova cinemática do espaço-tempo.

## Considerações finais

A história, a filosofia e a sociologia das ciências se estabeleceram como importantes abordagens no ensino de ciências, há tempos em crise. Os esforços em construir um discurso metacientífico mínimo que desse suporte a novas visões sobre as disciplinas científicas e seu ensino fizeram emergir as visões consensuais de natureza da ciência, que foram importantes para o desenvolvimento da área de pesquisa e para a orientação curricular. Porém, a natureza estanque e declarativa das listas de visões consensuais exige maiores esclarecimentos e debates sobre tópicos relevantes de natureza da ciência. Buscamos argumentar que tais aprofundamentos sobre a natureza da ciência devam ser ponderados pelos riscos de flerte com visões exageradamente relativistas, mas que ainda se preocupem em superar as visões positivistas ingênuas que persistem entre professores e alunos. Assim, consideramos que visões realistas e objetivistas críticas podem desempenhar importantes papéis no desenho de discursos metacientíficos desejáveis ao ensino, considerando os desafios impostos pela contemporaneidade.

Julgamos que aspectos de natureza da ciência associados à falibilidade das ciências, sua provisoriabilidade e às mudanças e revoluções científicas são temas tão complexos quanto sujeitos a interpretações inadequadas, no sentido de potencializar visões de descrença diante da ciência, seu crescimento cognitivo e sua capacidade explicativa e representacional do mundo natural. Com o intuito de desenvolver uma discussão histórico-epistemológica sobre os aspectos contínuos e descontínuos de desenvolvimento científico, mobilizamos conceitos e debates filosóficos concernentes às relações entre teoria e realidade.

As mudanças radicais às quais as ciências estão sujeitas podem ser alvo de reflexão sobre o realismo científico ao problematizarmos a continuidade dos esquemas teóricos que os cientistas dispõem para versar sobre a ordem natural: em que sentido as representações teóricas são bem-sucedidas em capturar a realidade externa do mundo? Se é possível falar em progresso científico, como entendê-lo, tendo em vista a provisoriabilidade dos mais fundamentais conhecimentos científicos? Tais questionamentos se agravam ao constatarmos o impacto que o recorrente abandono de entidades teóricas ao longo da história das ciências representou para as tradicionais visões realistas e objetivistas das ciências.

Objetivando solucionar a querela, John Worrall propõe o realismo estrutural – que remonta às ideias do matemático, físico e filósofo Henry Poincaré. Este posicionamento metacientífico busca preservar, tanto quanto possível, o realismo científico e uma noção de continuidade dos conteúdos cognitivos da ciência, mesmo admitindo a existência das revoluções científicas (Psillos,

1995). Aponta-se que, apesar dessas mudanças, as relações lógico-matemáticas são preservadas. Uma vez que uma teoria produz relações verdadeiras entre diferentes objetos, tais relações são “definitivamente adquiridas” e incorporadas às teorias subsequentes (Poincaré, 1995). O peso realista das ideias de Poincaré e Worrall reside não nos objetos em si, mas nas relações que a linguagem matemática tece entre os objetos e no caráter cumulativo e progressivo das mesmas. A identificação de estruturas formais que relacionam diferentes termos teóricos e que persistem ao longo de mudanças conceituais sugerem que existem importantes elementos de continuidade na ciência, e que a descoberta/criação de novas relações nas redes teóricas aponta para o crescimento e acúmulo do conhecimento sobre o mundo natural, diluindo o problema da descontinuidade e sendo coerente com visões críticas, porém otimistas frente ao empreendimento científico.

Com o objetivo de realizar um exercício de epistemologia histórica, estudamos um episódio que, no nosso entendimento, ilustra a continuidade estrutural ao longo de mudanças radicais nos fundamentos da física. As relações entre o coeficiente de arraste parcial do éter, proposto por Fresnel em 1818, e a revolucionária cinemática que emerge da teoria da relatividade restrita já haviam sido estudadas em profundidade por reconhecidos historiadores e epistemólogos da ciência, pavimentando o caminho para nosso estudo deste episódio. Consideramos que nossa contribuição se dá no diálogo entre esses estudos, o referencial teórico do realismo estrutural, e as querelas características de nossos tempos, a saber, a desconfiança perante a ciência e a necessidade de discursos epistemológicos e educacionais que nos permitam responder à altura do desafio.

A retenção do coeficiente de Fresnel como um caso especial das adições relativísticas de velocidade não torna evidente apenas o condicionante metodológico de escolha de teorias segundo o qual o formalismo das teorias predecessoras deve ser recuperado pelas sucessoras. Este episódio, conjugado com formas seletivas de realismo, como o realismo estrutural, nos permite enxergar significados mais profundos desta retenção no que tange aos estudos filosóficos que se propõem a investigar as relações entre as teorias científicas e a realidade do mundo que, pressupõe-se, existe independente de nós, seres cognoscentes.

A manutenção das estruturas matemáticas que estabelecem as relações entre os entes teóricos, dentre as quais se inclui o caso aqui apresentado, acusa a apreensão de uma harmonia intrínseca à ordem natural. Podemos argumentar que o sucesso empírico da hipótese de Fresnel, atestada pelos experimentos de resultado nulo e, mais surpreendentemente ainda, pelo experimento de Fizeau, de 1851, não se reduz apenas a uma conjectura *ad hoc* com o intuito de “salvar os fenômenos”, conforme instrumentalistas tendem a conceber. Sua adequação empírica revela que as entidades a que chamamos de espaço e tempo sempre nutriram as mútuas relações apreendidas apenas após a proposição da relatividade restrita, mesmo antes que nossas capacidades representativas do real pudessem sobre elas nos informar. Um olhar retrospectivo sobre os antecedentes históricos da teoria da relatividade por nós estudados e orientado pelo realismo estrutural torna defensável uma posição realista perante as relações entre tempo e espaço sintetizadas pelas transformações de Lorentz. Interpretamos que o coeficiente de Fresnel se revelou uma manifestação destas relações, mesmo que estas permanecessem insuspeitas à época. Afinal de contas, é notável como o coeficiente de arraste parcial do éter permaneceu resistente a interpretações físicas coerentes à mecânica clássica. Os fundamentos da mecânica newtoniana sempre foram avessos à incorporação do coeficiente sem o uso de hipóteses subsidiárias artificiais ou contraditórias. Entretanto, é razoável argumentar que este vínculo estrutural estabelecido entre a velocidade da luz em um corpo transparente e o estado

de movimento deste corpo, sempre exprimiu propriedades inatas da natureza, ou seja, era uma manifestação de certas necessidades da ordem natural, inescapáveis à sistematização física.<sup>13</sup>

A teoria de Fresnel para a óptica dos corpos em movimento se mostra um elo de continuidade entre as concepções clássicas e relativísticas do espaço e do tempo. Por mais que nosso entendimento sobre este aspecto da natureza, bem como nossas capacidades de representação (sempre indiretas, imperfeitas, perspectivas e contingentes), tenham sofrido importantes revoluções, somos capazes de argumentar que sempre tínhamos sob escrutínio a mesma realidade, mesmo tendo sido interpretada de maneiras diversas ao longo do desenvolvimento histórico da física.

Este episódio, analisado sob a visão do realismo estrutural, nos mostra que, apesar do abandono da entidade teórica considerada central na física do século XIX, podemos identificar traços da antiga teoria do éter de Fresnel na cinemática da relatividade especial. Do ponto de vista do ensino da natureza da ciência, isso nos mostra que é possível conciliar aspectos relativistas (no caso, representado pelo relativismo ontológico, dado por uma posição de humildade acerca da afirmação da existência das entidades teóricas) com aspectos que reafirmam certa estabilidade epistêmica das teorias científicas, neste caso, a retenção de elementos estruturais da óptica dos corpos em movimento de Fresnel.

Buscamos fortalecer concepções críticas de realismo científico ao sublinharmos que a imagem de natureza formada pelas teorias físicas não pode ser considerada reflexo perfeito do mundo, uma vez que está sujeita à ressystematizações conceituais radicais. Tal imagem de mundo está, portanto, sujeita a modificações que provavelmente os cientistas de hoje não possam sequer imaginar. Embora o caráter por vezes revolucionário da ciência seja um traço importante da ciência, não se justifica nenhuma suspeição sobre sua capacidade de organizar e dar sentido ao domínio empírico do mundo, sistematizando importantes elementos da realidade intrínseca da natureza, mesmo que isso não signifique que possamos conhecer as *coisas em si*, mas sim as relações matemáticas que as teorias produzem entre seus objetos teóricos. Estas, segundo o realismo estrutural, são definitivamente adquiridas, residindo nelas o peso da realidade, reivindicado pelos realistas, e relevante a uma concepção educacional e epistemológica capaz de atualizar o discurso sobre a natureza da ciência em relação aos desafios da contemporaneidade, objetivando posições criticamente realistas.

## Referências bibliográficas

ALLCHIN, D. Evaluating knowledge of the nature of (whole) science. *Science Education*, v. 95, n. 3, p. 518-542, 2011.

ALTERS, B. J. Nature of science: a diversity or uniformity of ideas? *Journal of Research in Science Teaching*, v. 34, n. 10, p. 1105-1108, 1997.

ARAGO, F. Mémoire sur la vitesse de la lumière, lu à la première classe de l'Institut, le 10 décembre 1810. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, v. 36, p. 38-49, 1853.

ARTHURY, L. H. M.; GARCIA, J. O. Em prol do realismo científico no ensino. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 26, p. 1-14, 2020.

13 Sobre os conceitos de matéria e necessidade e suas relações com o realismo, ver Paty (2006).

- BRADING, K.; CRULL, E. Epistemic structural realism and Poincaré's philosophy of science. *Hopos: The Journal of the International Society for the History of Philosophy of Science*, v. 7, n. 1, p. 108-129, 2017.
- BUNGE, M. *Caçando a realidade: a luta pelo realismo*. Trad. de Gita K. Guinsburg, São Paulo: Perspectiva, 2010.
- CASSINI, A., LEVINAS, M. L. Einstein's reinterpretation of the Fizeau experiment: how it turned out to be crucial for special relativity. *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, v. 65, p. 55-72, 2018.
- CUPANI, A. O.; PIETROCOLA, M. P. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, número especial, p. 100-125, 2002.
- DARRIGOL, O. *A history of optics from Greek Antiquity to the nineteenth century*, Oxford, UK: Oxford University Press, 2012.
- EFLIN, J. T.; GLENNAN, S.; REISCH, G. The nature of science: a perspective from the philosophy of science. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 36, n. 1, p. 107-116, 1999.
- EINSTEIN, A. Ether and the theory of relativity. In: JANSEN, M.; NORTON, J.D.; RENN, R.; SAUER, T.; STACHEL, J. (orgs.) *The genesis of general relativity: sources and interpretations*. Dordrecht: Springer, 2007. p. 1537-1542.
- FORATO, T. C.; PIETROCOLA, M.; MARTINS, R. A. Historiografia e natureza da ciência na sala de aula. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 28, n. 1, p. 27-59, 2011.
- FRANKEL, E. Corpuscular optics and the wave theory of light: the science and politics of a revolution in physics. *Social Studies of Science*, v. 6, n. 2, p. 141-184, 1976.
- FRENCH, A. P. *Special relativity*. New York: Norton, 1968. (The MIT Introductory Physics series)
- FRESNEL, A. Lettre D'Augustin Fresnel à François Arago, sur l'influence du mouvement terrestre. In: SENARMONT, M.M.H.; VERDET, V.; FRESNEL, L (orgs.). *Fresnel, Augustin (1788-1827): oeuvres complètes d'Augustin Fresnel*. Paris: Imprimerie Impériale, 1863. p. 1866-1870.
- HACKING, I. *Representing and intervening: introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- HIROSIGE, T. Origins of Lorentz' theory of electrons and the concept of the electromagnetic field. *Historical Studies in the Physical Sciences*, v. 1, p. 151-209, 1969.
- HIROSIGE, T. The ether problem, the mechanistic worldview, and the origins of the theory of relativity. *Historical Studies in the Physical Sciences*, v. 7, p. 3-82, 1976.
- HUNT, B. *Os seguidores de Maxwell*. Trad. de Antônio Emílio Angueth de Araújo. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015.
- IRZIK, G.; NOLA, R. A family resemblance approach to the nature of science for science education. *Science & Education*, v. 20, n. 7-8, p. 591-607, 2011.
- JANSSEN, M.; The drag coefficient from Fresnel to Laue, In: MAAS, A.; SCHATZ, H. (orgs.). *Physics as a calling, science for society: studies in honour of A.J. Kox*. Leiden: Leiden University Press, 2013. p. 47-60.
- JANSSEN, M., STACHEL, J. *The optics and electrodynamics of moving bodies*. 2004. Disponível em: <https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/Preprints/P265.PDF>, Acesso em: 12 set. 2022.
- KUHN, T. S. *A estrutura das revoluções científicas*. Trad. de Beatriz Vianna Boeira; Nelson Boeira. 12ª ed. São Paulo: Perspectiva, 2013.
- LAUDAN, L. A confutation of convergent realism. *Philosophy of Science*, v. 48, n. 1, p. 19-49, 1981.
- LAUE, M. Die Mitführung des Lichtes durch bewegte Körper nach dem Relativitätsprinzip. *Annalen der Physik*, v. 328, p. 989-990, 1907.
- LEDERMAN, N.G. et al. Views of nature of science questionnaire: toward valid and meaningful assessment of learners' conceptions of nature of science. *Journal of Research in Science Teaching*, v. 39, n. 6, p. 497-521, 2002.
- LEDERMAN, N.G. et al. Nature of science: Past, present, and future. In: ABELL, S.K.; LEDERMAN, N.G. (org.). *Handbook*

- of research on science education*. Londres: Routledge. 2007. p. 831-879.
- MARTINS, A.F.P. Natureza da ciência no ensino de ciências: uma proposta baseada em temas e questões. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 32, n. 3, p. 703-737, 2015.
- MARTINS, R.D.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.D.A. *A origem histórica da relatividade especial*. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2015.
- MATTHEWS, M.R. Changing the focus: from nature of science (NOS) to features of science (FOS). In: KHINE, M. (org.) *Advances in nature of science research*. Dordrecht: Springer, 2012. p. 3-26.
- MATTHEWS, M.R. *Science teaching: the contribution of history and philosophy of Science*. 20th anniversary revised and expanded edition, 2ª ed., Londres: Routledge, 2014.
- MCCOMAS, W. F. Ten myths of science: reexamining what we think we know about the nature of science. *School Science and Mathematics*, v. 96, n. 1, p. 10-16, 1996.
- MCCOMAS, W. F.; ALMAZROA, H.; CLOUGH, M. P. The nature of science in science education: an introduction. *Science & Education*, v. 7, n. 6, p. 511-532, 1998.
- MCCORMMACH, R. H.A. Lorentz and the electromagnetic view of nature. *Isis*, v. 61, n. 4, p. 459-497, 1970.
- MENEZES, R., LORDÊLO, F. Uma análise de experimentos de corpos em movimento no éter sob a perspectiva da teoria ondulatória da luz de Fresnel. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 41, n. 2, p. 1-12, 2019.
- NEWBURGH, R. Fresnel drag and the principle of relativity. *Isis*, v. 65, n. 3, p. 379-386, 1974.
- NIINILUOTO, I. *Critical scientific realism*. Oxford, UK: Oxford University Press. 1999.
- PATY, M. Matéria e necessidade no conhecimento científico. *Scientiae Studia*, v. 4, n. 4, p. 598-613, 2006.
- PATY, M. *Einstein*. Trad. Mário Laranjeira. São Paulo: Estação Liberdade, 2008. (Figuras do Saber, v. 22)
- PEDERSEN, K.M. Water-filled telescopes and the pre-history of Fresnel's ether dragging. *Archive for History of Exact Sciences*, v. 54, n. 6, p. 499-564, 2000.
- PEREIRA, F.P.C. *A ótica dos corpos em movimento sob a visão do realismo estrutural: questões não consensuais da natureza da ciência na formação de professores*. 2021. 298 p. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências: Modalidade Física) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.
- PEREIRA, F.P.C.; GURGEL, I. O ensino da natureza da ciência como forma de resistência aos movimentos anti-ciência: o realismo estrutural como contraponto ao relativismo epistêmico. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 37, n. 3, p. 1278-1319, 2020.
- PÉREZ, D.G. et al. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. *Ciência & Educação*, v. 7, n. 2, p. 125-153, 2001.
- PIETROCOLA, M. *Mascart et L'optique de corps en mouvement*. 1992. Tese (Doutorado em Epistemologia e História das Ciências) – Université de Paris VII, Paris. 1992.
- PIETROCOLA, M. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da terra sobre a propagação da luz. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 10, n. 2, p. 157- 172, 1993.
- PIETROCOLA, M. A ciência francesa e a óptica dos corpos em movimento. *Revista da SBHC*, v. 13, p. 45-52, 1995.
- POINCARÉ, H. *O valor da ciência*. Trad. Maria Helena Franco Martins. Rio de Janeiro: Contraponto, 1995.
- POINCARÉ, H. *A ciência e a hipótese*. Trad. Maria Auxiliadora Kneipp. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1984.
- POINCARÉ, H. Sobre a dinâmica dos elétrons. In: VIDEIRA, A.P., MOREIRA, I.C. (orgs.). *Ensaio fundamentais*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto; PUC-Rio, 2008.

A óptica dos corpos em movimento de Fresnel sob a visão do realismo estrutural: ensino de natureza da ciência e as demandas educacionais da contemporaneidade

PSILLOS, S. Is structural realism the best of both worlds? *Dialectica*, v. 49, n. 1, p. 15-46, 1995.

PSILLOS, S. *Scientific realism: how science tracks truth*. Londres: Routledge, 1999.

PSILLOS, S. Conventions and relations in Poincaré's philosophy of science. *Method-Analytic Perspectives*, v. 3, n. 4, p. 98-140, 2014.

ROMERO-MALTRANA, D. et al. The "nature of science" and the perils of epistemic relativism. *Research in Science Education*, v. 49, n. 6, p. 1735-1757, 2017.

SARTON, G. Discovery of the aberration of light. *Isis*, v. 16, n. 2, p. 233-265, 1931.

STACHEL, J. Fresnel's (dragging) coefficient as a challenge to 19th century optics of moving bodies. In: KOX, A.J.; EISENBAEDT, J. (orgs.). *The universe of general relativity*. Boston: Birkhäuser Boston, 2005a. p. 1-13.

STACHEL, J. (org). *O ano miraculoso de Einstein: cinco artigos que mudaram a face da física*. Trad. Alexandre Carlos Tort. Rio de Janeiro: Editora UFRJ, 2005b.

YOUNG, T. The Bakerian Lecture: experiments and calculations relative to physical optics. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, n. 94, p. 1-16, 1804.

WHITTAKER, E. *A history of the theories of aether and electricity*. London: Thomas Nelson, 1951.

WILSON, D. George Gabriel Stokes on stellar aberration and the luminiferous ether. *The British Journal for the History of Science*, v. 6, p. 57-72, 1972.

WORRALL, J. Structural realism: the best of both worlds? *Dialectica*, v. 43, n. 1-2, p. 99-124, 1989.

ZANETTI, J. *Física também é cultura*. 1990. 252p. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

Recebido em julho de 2022

Aceito em outubro de 2022