

## O ARRASTAMENTO PARCIAL DO ÉTER DE FRESNEL COMO EXPLICAÇÃO CIENTÍFICA

### THE FRESNEL'S ETHERIAL DRAG AS A SCIENTIFIC EXPLANATION

Thaís Cyrino de Mello Forato<sup>1</sup>  
Maurício Pietrocola<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo / EDM / Faculdade de Educação ([thaiscmf@usp.br](mailto:thaiscmf@usp.br))

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo / EDM / Faculdade de Educação ([mpietro@usp.br](mailto:mpietro@usp.br))

#### RESUMO

Um debate filosófico que se intensificou no início do século XX questionou a capacidade da ciência em fornecer explicações. Desde então, filósofos da ciência, cientistas e educadores têm debatido o tema. Algumas propostas recentes se configuram em torno da modelização de teorias como recurso explicativo utilizado pela ciência, mas o sucesso de uma explicação parece estar vinculado à sua capacidade de satisfazer o interlocutor. Auxiliando na tarefa de fornecer uma explicação, recursos como episódios da história da ciência e a introdução de entes inobserváveis para a construção de teorias e modelos têm se mostrado eficientes. Neste trabalho pretendemos apresentar como o arrastamento do éter na teoria de Fresnel pôde constituir uma explicação científica.

**Palavras-chave:** explicação científica, sentimento de entendimento, modelização, éter, Fresnel.

#### ABSTRACT

A philosophical debate intensified in the beginning of the XX century questioned the science capacity of explanations supply. Ever since, philosophers of the science, scientists and educators have been debating the theme. Some recent proposals has configured around the modeling of theories as explanatory resources used by science, but the success of an explanation seems to be linked to his capacity to satisfy the speaker. Aiding the task of supply explanations, resources like episodes of the history of science and introduction of entities unseen for construction theories and models have shown efficient. In this article we intended to present how the dragging ether in the Fresnel's theory could constitute a scientific explanation

**Keywords:** scientific explanation, feeling of understanding, modeling, ether, Fresnel.

## INTRODUÇÃO

O desejo de compreender situações, fatos, relações ou fenômenos inquietou os homens em todas as épocas de nossa história, e levou cada civilização a construir e sistematizar seu próprio corpo de conhecimentos. Mitos, filosofia, ciência e religião são formas elaboradas da invenção humana que, dentre outras coisas, pretendem produzir entendimento sobre o mundo. Mais especificamente no caso da ciência, geralmente considera-se que uma de suas principais funções seria fornecer explicações para os fenômenos naturais. Mas, em que medida as explicações científicas podem levar a uma resposta considerada satisfatória? Que requisitos uma explicação científica deve apresentar para fornecer um sentimento de entendimento em um dado interlocutor?

Nossa hipótese é de que o sucesso de uma explicação é alcançado quando ela apresentar requisitos que satisfaçam o interlocutor, sendo capaz de gerar entendimento. Ainda que correntes filosóficas questionem se a ciência fornece a causa de um fenômeno ou apenas o descreve, acreditamos que, no contexto educacional, uma explicação científica será considerada satisfatória quando promover um *sentimento de entendimento* no inquiridor. Além disso, sua validade está também vinculada ao que cada época considera satisfatória, além de critérios intrínsecos ao próprio aluno. Para ilustrar essa idéia, apresentamos um episódio de história da ciência que agrega elementos relevantes para a compreensão de alguns fatores envolvidos na formulação de teorias e sua capacidade para fornecer explicações, bem como suas limitações, revelando o caráter dinâmico da ciência. Creemos que discussões históricas e epistemológicas são necessárias para o educador tomar conhecimento do estatuto epistemológico da ciência. Tais estudos auxiliam no momento de transpor os produtos científicos para a sala de aula.

## EXPLICAÇÃO E DESCRIÇÃO

Geralmente é admitido pela comunidade científica e educacional em ciências que o conhecimento científico é concebido como acesso ao mundo, outorgando-lhe sentido, explicando-o e considerando que um fato e sua correta explicação são, muitas vezes, inseparáveis.<sup>1</sup> Neste sentido, tem-se recorrido ao uso de modelização das teorias para explicar fenômenos naturais, construindo, assim, uma representação do mundo físico.<sup>2</sup> Tal prática é sustentada pela crença de que uma *explicação científica fornece a causa de um fenômeno*, sendo a causa entendida como uma “relação entre eventos ou circunstâncias particulares distintas”.<sup>3</sup>

Ao longo da história da ciência, segundo Martins (1993), em alguns momentos foi preciso introduzir entes inobserváveis para construir teorias capazes de explicar regularidades observáveis em alguns fenômenos.<sup>4</sup> Tais entes inobserváveis são admitidos na prática científica e, a partir deles, é possível construir vários modelos denominados “modelos científicos substanciais”. A utilidade científica desses entes está na possibilidade de fornecerem uma explicação do mundo sensível, mas, por princípio, eles não têm conexão causal com nosso domínio sensorial. No entanto, essa prática científica foi criticada por alguns filósofos, uma vez que não se pode assegurar, a partir da observação de certos fenômenos, qual sua causa

<sup>1</sup> Concari, 2001, p.85.

<sup>2</sup> Veja por exemplo: Gilbert & Boulter, 1998 e 2000; Pietrocola, 1999 e 2001 e Colinvaux, 1998.

<sup>3</sup> Strawson, 2002, p. 151. Não apresentaremos a discussão sobre explicações e causalidades realizada pelo autor devido a limitação de espaço, mas sugerimos a leitura do capítulo 9 que aborda tal debate.

<sup>4</sup> Martins, 1993, p. 13-14.

inobservável. O problema se coloca, pois é possível construir vários modelos substanciais conflitantes que explicam de modo diferente os mesmos fenômenos. Ernst Mach e Pierre Duhem negaram o papel explicativo dos modelos substanciais em favor de uma ciência fenomenológica. Henri Poincaré defendia uma posição distinta. Para ele, os modelos só são prejudiciais na ciência se forem confundidos com a realidade, mas em alguns domínios de estudo, a introdução de modelos substanciais pode ser útil.<sup>5</sup>

No início do século XX, as discussões sobre a validade dos modelos substanciais e a possibilidade de uma explicação científica fornecer a causa de um fenômeno intensificaram o debate no âmbito da filosofia da ciência. Pierre Duhem sustentou a idéia de que as teorias científicas representam, mas não explicam leis experimentais. Em 1900, Karl Pearson coloca, no prefácio de seu livro *The grammar of science*, que a ciência é descrição, mas não explicação.<sup>6</sup> Aumentando a controvérsia, Ludwig Wittgenstein afirma que: “na base de toda visão moderna do mundo está a ilusão de que as chamadas leis da natureza são as explicações dos fenômenos naturais”, enquanto Bertrand Russell, em 1913, questionava a possibilidade de uma explicação encontrar a causa do que busca compreender argumentando que “a palavra causa está tão inexplicavelmente presa a associações enganosas que sua completa exclusão do vocabulário científico se faz necessário”.<sup>7</sup>

Tal debate ensejou inúmeros estudos ao longo do século XX. Vários filósofos da ciência como Pierce, Meyerson, Bachelard, Popper, Kuhn, Laudan e Bunge refletiram sobre o problema da explicação. Os epistemólogos, de um modo geral, atribuíram o poder explicativo das teorias à sua capacidade de prever acontecimentos naturais e de manipular objetos da natureza. Tanto entre aqueles que se preocuparam com questões normativas ou por questões fácticas, a explicação científica foi um dos temas analisados.<sup>8</sup>

### FILÓSOFOS E A EXPLICAÇÃO CIENTÍFICA

Dentre as perspectivas mais recentes sobre o assunto, Rom Harré, filósofo da ciência, defende que a função das teorias é explicar, e nelas se exprime a compreensão do mundo. No entanto, ele admite que dois modelos opostos, tanto do ponto de vista lógico como epistemológico e metafísico, propõem a existência de dois tipos diferentes de teoria no que se refere às explicações científicas.<sup>9</sup> Um desses modelos baseia-se no conceito de forças e outro no conceito de vírus, e eles produzem formas distintas de explicação. Harré procura mostrar que a teoria mecânica traz um tipo de explicação diferente daquela fornecida pela teoria da transmissão da doença (que é diferente da descrição da doença).

A teoria mecânica introduz a força, um ente inobservável, cuja função é pragmática. Esse ente pode ser banido da teoria, segundo Harré, sem alteração drástica da mesma. Tal teoria organiza-se no seio de um sistema lógico e, a partir de princípios básicos, se deduzem as leis do movimento. Mas, permanece nossa questão: essas leis explicam ou descrevem o movimento?

<sup>5</sup> Martins, 1993.

<sup>6</sup> Concari, 2001, p.87.

<sup>7</sup> Weinberg, 2001.

<sup>8</sup> Concari, 2001, p.86.

<sup>9</sup> Harré, 1988, p. 197. Harré dedica todo o capítulo VI para discutir as explicações científicas onde recorre a considerações interessantes acerca da analogia e dos modelos, cuja abordagem nesse momento alongaria sobremaneira nosso trabalho.

A explicação científica dos acontecimentos quer se trate de sucessos individuais quer das suas seqüências, **consiste em descrever o mecanismo** que os produz. Só muito remotamente poderá dizer-se que a ciência mecânica explica o curso do movimento. As leis da mecânica são **descritivas e não explanatórias**.<sup>10</sup>

Quando a teoria viral da doença foi proposta, também introduziu um ente inobservável (naquela época), mas este ente não pode ser banido da teoria, pois implicaria em distintas concepções de doença e cura.<sup>11</sup> O vírus, ao contrário da força, fornece uma explicação científica sobre o curso da doença.

A presença do vírus explica aquilo que se descreve como síndrome ou desenrolar da doença, e quanto mais soubermos sobre a natureza e sobre o comportamento dos vírus, mais saberemos acerca da doença. É a interação do corpo do hospedeiro e do vírus seu parasita que origina os sintomas da doença que **fornece a explicação** do seu progresso. A teoria viral da poliomielite é, de facto, uma explicação científica, enquanto as magnificamente sistematizadas leis da mecânica o não são.<sup>12</sup>

As entidades inobserváveis introduzidas nas teorias, nos exemplos apresentados por Harré, seriam responsáveis pelo mecanismo causal nas explicações científicas. Para explicar um fenómeno é necessário saber descrever esse mecanismo causal. Portanto, idealmente para ele, a teoria deveria descrever o processo de um fenómeno que se procura compreender. Entretanto, cabe perguntarmos: em que medida descrever o processo de um fenómeno é reportar-se à sua causa? Ou ainda, o que consideramos mecanismo causal de fato reporta-se à causa primeira do fenómeno?

Para Harré, a possibilidade de explicação ocorre quando dispomos o conhecimento em estratos. Num primeiro momento, no estrato da observação, descobrem-se mecanismos de repetição regulares, não aleatórios, que impõem uma explicação. Depois, a explicação fornecida é a descrição dos mecanismos causais, em geral não observáveis, responsáveis pelo comportamento que dá origem aos esquemas observados. Este processo de estratificação prossegue até que a ciência atinja as relações fundamentais reconhecidas em cada época. Portanto, uma barreira imposta não pela natureza, mas por nossas próprias limitações. Harré defende que a capacidade de explicação de uma teoria está, de algum modo, vinculada ao que cada época considera satisfatório, e a introdução de entes inobserváveis é também uma ferramenta válida na elaboração de teorias científicas.

Nem todos os filósofos, cientistas ou educadores atualmente preocupam-se, incisivamente, com a distinção entre explicação e descrição, mas, parece-nos que de maneira pragmática, a discussão encaminha-se para o *sentimento de entendimento* que uma explicação pode fornecer. De um modo intuitivo, podemos considerar que tal sentimento de entendimento seria um estado psicológico singular que conduz o interlocutor a sentir-se suficientemente esclarecido em relação ao fato indagado.<sup>13</sup> Obviamente, sendo tal sentimento muitas vezes guiado por critérios subjetivos, ele não pode ser considerado como parâmetro para arbitrar a validade de uma explicação científica. Vários filósofos, educadores e cientistas como Bunge,

<sup>10</sup> *Ibid*, p.199. Grifo nosso. De fato, na época em que Newton propõe a sua teoria mecânica, ele rompe com a busca da causação primeira ao descrever como os fatos ocorrem e não porque ocorrem.

<sup>11</sup> Note que o trabalho de Harré escrito em 1988 ainda não contempla a observação dos vírus, mas isso não interfere no objetivo de nossa argumentação. Sobre a observação de vírus veja um exemplo em: <http://inventabrasilnet.t5.com.br/virus.htm>.

<sup>12</sup> Harré, 1988, p. 199.

<sup>13</sup> Custódio e Pietrocola, 2004.

Hempel, Gilbert, Weimberg, Friedman, Brewer apresentam propostas para a questão. Embora não haja uma única possibilidade consensual, elas parecem oferecer conciliação entre o rigor do “*exame filosófico tradicional e a exigência de uma dimensão subjetiva no entendimento propiciado pelas explicações científicas*” .<sup>14</sup>

### ATRIBUTOS E A QUALIDADE DA EXPLICAÇÃO CIENTÍFICA

Para que uma explicação possa ser aceita como válida pelo interlocutor oferecendo um sentimento de entendimento, ela deve apresentar alguns atributos. No estudo apresentado por Brewer, Clarke e Chinn (1998), tal dimensão subjetiva de entendimento que uma explicação pode propiciar, parece predominar sobre questões puramente filosóficas. Os autores pretendem distinguir a explicação de outros processos conceituais como descrição ou avaliação. Segundo eles, a explicação é um relato que fornece uma estrutura conceitual para um fenômeno que leva o interlocutor a *um sentimento de entendimento*. Esta estrutura conceitual pode ser um fato, uma lei, ou uma teoria e sempre vai além do fenômeno que busca explicar, constituindo-se uma estrutura mais geral que integra diversos aspectos do mundo. Deste modo, submeter um fenômeno a uma estrutura conceitual maior, permite reduzir a arbitrariedade do fenômeno. Os autores citam Woodward, Friedman e Kitcher defendendo idéias muito parecidas, ou seja, para que algo possa ser considerado uma explicação, deve submeter-se a uma estrutura conceitual maior que o fenômeno original.<sup>15</sup>

A respeito dos debates entre filósofos da ciência e cientistas sobre a natureza das explicações científicas, Brewer *et al.* (1998) acreditam que os debates dos últimos 40 anos convergem para a hipótese defendida por eles: explicações científicas (i) fornecem uma estrutura conceitual para o fenômeno; (ii) vão além do fenômeno original; (iii) integram uma gama de fenômenos; (iv) mostram como o fenômeno original segue da estrutura; (v) proporcionam um sentimento de entender; e (vi) devem ser testáveis. Esta última exigência, a da testabilidade, pode ser considerada como um requisito que deriva da revolução científica.

Para não cientistas a qualidade de uma explicação pode ser avaliada mediante alguns atributos: a) Suporte empírico; b) Alcance, de forma que abarquem um grande número de fenômenos; c) Consistência; d) Simplicidade; e) Plausibilidade: o grau para o qual a explicação particular é consistente com as maiores convicções íntimas, subjetivas do indivíduo.

Para cientistas, uma explicação científica deve possuir, além destes, ainda outros atributos: f) Precisão: a capacidade de produzir previsões precisas; g) Formalismo: podendo ser expressa de forma matemática; h) Fecundidade: proporcionando orientação para pesquisas futuras.

Brewer *et al.* apresentam o resultado de pesquisas mostrando que as explicações que apresentam tais atributos são aquelas que mais possibilitam um sentimento de entendimento ao interlocutor, sejam crianças, não-cientistas ou cientistas. A proposta dos autores para a natureza das explicações científicas parece reforçar nossa hipótese sobre o debate entre descrição e explicação. O que prevalece como critério nessa diferenciação é a capacidade de uma explicação em satisfazer seu interlocutor, mas esta não é uma discussão que ocorre no campo filosófico.

<sup>14</sup> *Ibid.* Os autores apresentam algumas dessas propostas, inclusive o debate entre Friedman e Hempel.

<sup>15</sup> Tal idéia converge com a clássica interpretação de Hempel.

## EXPLICAÇÕES CIENTÍFICAS E O ENSINO DE CIÊNCIAS

E do ponto de vista do ensino de ciências, como se coloca a questão? Segundo uma análise apresentada por Cupani e Pietrocola (2002) sobre a epistemologia de Mario Bunge, a explicação de eventos reais é a principal operação científica. A ciência não se limita a descrever o mundo e “constitui a melhor estratégia inventada até hoje para responder à pergunta sobre o *porquê* dos eventos”.<sup>16</sup> Para Bunge, todas as explicações racionais seguem uma mesma estrutura lógica: o fenômeno que se quer explicar submete-se a uma ou mais generalizações (leis ou regras). Segundo os autores, a reconstrução lógica de Bunge segue as conhecidas propostas clássicas de Hempel e Popper.

A explicação científica não se limita a vincular a existência de um acontecimento, ou a ocorrência de um fenômeno, à leis, mas sim, insere a descrição de um fato numa teoria; e para Bunge, é justamente tal fundamentação teórica que permite a uma explicação científica não ser, meramente, a inclusão de um enunciado singular em enunciados gerais. Nesse sentido, Cupani e Pietrocola apontam a diferença entre submeter um fato a teorias de “caixa preta” ou submete-lo a teorias “representacionais” (refere-se ao *modus operandi* dos sistemas, fornecendo explicações mais profundas).<sup>17</sup> Desta forma, a explicação científica implica na construção de modelos que buscarão explicitar o “mecanismo” do fato a ser explicado. Assim, a compreensão que uma explicação científica pode fornecer, só será entendida pelo especialista, familiarizado com as idéias técnicas envolvidas na elaboração do modelo.

A consequência disso para o ensino de ciências é que o conhecimento científico precisa ser transformado para chegar à sala de aula, pois os objetivos e interesses do ambiente escolar diferem daquele do contexto da prática profissional da ciência. Este processo de migração do conhecimento científico, conhecido como *transposição didática*<sup>18</sup> implica numa reestruturação deste conhecimento. Segundo Cupani e Pietrocola, esse caminho é inevitável e pode ser muito difícil. Alguns livros didáticos trazem “concepções errôneas sobre a ciência, seus produtos e métodos” reforçando os mitos do senso comum sobre a natureza do conhecimento científico. É necessário, neste contexto, que o educador esteja preparado para lidar com tais situações e é fundamental que ele “entenda os processos de produção da ciência, assim como as características e estatuto do conhecimento por ela produzido”.<sup>19</sup>

Nesse sentido, a análise de episódios de história da ciência pode auxiliar a compreensão do estatuto epistemológico do conhecimento científico. O debate entre diferentes teorias em determinados períodos históricos pode fornecer uma idéia menos distorcida do processo do fazer científico. Assim, a elaboração de modelos como explicação científica para determinados fenômenos configura-se uma ferramenta útil ao ensino de ciências.

As representações científicas do mundo real produzem-se através de modelos teóricos. Tais modelos enfocam apenas alguns aspectos da realidade, consideram apenas algumas variáveis e introduzem apenas algumas relações entre elas. O realismo da ciência visto desta forma, contrapõe-se ao realismo ingênuo que afeta o ensino, sem, no entanto, ceder às sedutoras teses do construtivismo radical, para o qual nada existe fora do sujeito.<sup>20</sup>

<sup>16</sup> Cupani e Pietrocola, 2002, p.113.

<sup>17</sup> *Ibid*, p. 114-5.

<sup>18</sup> Veja sobre a transposição didática em Chevallard, 1991.

<sup>19</sup> *Ibid*, 116-7.

<sup>20</sup> *Ibid*, p.121-2.

O objetivo da modelização não é oferecer uma explicação científica como cópia da realidade, mas uma representação simbólica dela, de modo que tal representação sempre pode ser aperfeiçoada.<sup>21</sup> Recorrer aos modelos ou a construção de entes inobserváveis constitui um instrumento válido à ciência na elaboração de suas explicações.

### UM EXEMPLO HISTÓRICO: O ÉTER COMO EXPLICAÇÃO CIENTÍFICA

Temos defendido que o sucesso de uma explicação não depende dela explicitar a causa de um fenômeno ou descrever seu mecanismo, mas, gerar sentimento de entendimento no interlocutor. Tal sucesso e a validade de uma explicação estão também vinculados a requisitos que variam em diferentes períodos históricos. Vamos apresentar a teoria de Fresnel do arrastamento parcial do éter, que acreditamos ser um exemplo adequado, por trazer elementos que permitem compreender a complexidade do fazer científico.<sup>22</sup> Como o conceito de éter apresentou características diferentes ao longo da história, e mesmo durante o século XIX sua conceituação sofreu alterações, apresentamos, brevemente, o modo como o problema se colocava na época e, assim, porque a teoria de Fresnel constituiu uma explicação científica capaz de explicar, de modo satisfatório ao período, regularidades observáveis em alguns fenômenos.<sup>23</sup> O éter era um ente inobservável que em vários períodos históricos foi útil na construção de teorias e modelos que compunham as explicações científicas. Ele permitia compreender alguns fenômenos que não eram possíveis de compreender apenas com a explicação baseada em entes observáveis.<sup>24</sup>

### HISTÓRICO DA QUESTÃO

Desde a Idade Média, de diferentes formas, existiu a preocupação em saber se seria possível decidir por meio da experiência se a Terra se move ou não. Caso a Terra se movesse 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 seriam vistas da Terra em diferentes locais, e isso deveria produzir variações angulares em suas posições. Robert Hooke (em 1674), Jean Picard (de 1670 até 1680) e James Flamsteed (em 1689) detectaram movimentos aparentes das posições das estrelas ao longo do ano, mas as mudanças de posição eram perpendiculares às direções em que deveriam ocorrer se fossem devidas à paralaxe.<sup>25</sup>

Em 1725, após vários meses de observação, James Bradley (1692-1762) e Samuel Molyneux (1689-1728) mediram variações da posição de uma estrela, mas a direção dessa variação – como nos casos anteriormente citados – não era a esperada. Em 1727, Bradley explicou o fenômeno como sendo devido ao movimento da Terra, mas que não correspondia à simples mudança de *posição* do observador: era um efeito devido à *variação na direção da velocidade* da Terra, que foi denominado “aberração”.<sup>26</sup> As medidas e a interpretação de Bradley foram aceitas rapidamente. Embora não fosse explícito, o argumento utilizado por ele supunha que a luz se comportava como um conjunto de partículas. Durante o século XVIII, a

<sup>21</sup> *Ibid*, p.124.

<sup>22</sup> Larry Laudan considera que a teoria de Fresnel apresentava impressionante sucesso preditivo, além de configurar-se um notável exemplo histórico de teorias bem sucedidas, mas não confirmadas à luz do presente. Veja um interessante estudo a esse respeito discutindo o realismo científico em Worrall, 1994.

<sup>23</sup> Veja sobre várias concepções distintas de éter no século XIX em Nercessian, 1984.

<sup>24</sup> Martins, 1993.

<sup>25</sup> Stewart, 1964.

<sup>26</sup> Pedersen, 1980.

interpretação corpuscular da luz era aceita por quase todos, mas Leonhard Euler (1707-1783) publicou uma importante defesa da teoria ondulatória da luz em 1746.<sup>27</sup> Entre outros resultados, Euler mostrou que a teoria ondulatória da luz também permitia explicar o fenômeno de aberração da luz das estrelas. Até o final do século XVIII, a teoria corpuscular da luz parecia ocupar um lugar preponderante nas explicações dos fenômenos ópticos e havia poucos defensores da teoria ondulatória. A situação começou a mudar nas duas primeiras décadas do século XIX, pois o estudo de diversos fenômenos foi reforçando rapidamente a idéia de que a luz seria uma onda.<sup>28</sup> Os experimentos de Étienne Louis Malus (1775-1812) e David Brewster (1781-1868) sobre o fenômeno da polarização contribuíram para esse quadro. 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 a sua interpretação.<sup>29</sup>

### O EXPERIMENTO DE ARAGO

Em 1810, François Jean Dominique Arago (1786-1853) realizou um experimento com o 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 considerou que a velocidade da luz dentro do prisma 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 dela, pois 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. 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.<sup>30</sup> No entanto, ao realizar o experimento, o resultado previsto não foi observado.<sup>31</sup>

Na análise do experimento, Arago pressupunha a validade da teoria de Newton (corpuscular) para a luz, e o resultado nulo obtido mostrava que a teoria não era capaz de fornecer uma boa explicação para o seu comportamento. Porém, o problema contribuiu para que esses resultados fossem explicados mediante uma interpretação ondulatória para a luz. 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 apresentado por Augustin Jean Fresnel (1788-1827), defendendo a teoria ondulatória, teve tal impacto que todos decidiram conceder-lhe o prêmio, em 1818. Nessa época, Arago era o presidente da Academia de Ciências. Ele consultou Fresnel a respeito do seu antigo experimento, 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.<sup>32</sup>

<sup>27</sup> Oliveira, 1993, p.161; Whittaker, p. 97-98.

<sup>28</sup> Buchwald, 1989.

<sup>29</sup> Chen, 1997; Worrall, 1976.

<sup>30</sup> Oliveira, 1993b, pp. 162-164

<sup>31</sup> O trabalho só foi publicado muito depois em 1853: F. Arago, "Mémoire sur la vitesse de la Lumière, lu à la première Classe de l'Institut, le 10 décembre 1810", pp. 38-49.

<sup>32</sup> Fresnel, 1818.

De acordo com a teoria ondulatória da época, a velocidade de propagação da luz não depende da fonte emissora, mas do meio no qual a luz se propaga. O éter era suposto imóvel e indiferente ao movimento dos corpos, mas isso não podia explicar o resultado obtido por Arago. Caberia a Fresnel a difícil missão de conciliar o resultado da experiência e a interpretação ondulatória.<sup>33</sup> 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.<sup>34</sup>

### A TEORIA DE FRESNEL

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

Se era a densidade do éter que variava, 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, temos uma parcela  $k$  igual a:

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

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 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:

<sup>33</sup> Oliveira, 1993, p.164.

<sup>34</sup> Mayrargue, 1990.

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

Note-se que a teoria de Fresnel é complexa e quantitativa, não se limitando a simples especulações sobre o éter. Fresnel analisou o experimento de Arago e mostrou que existem efeitos que se anulam, e não é possível medir nenhum efeito do movimento da Terra através do éter.

Fresnel mostrou que a refração processada sobre um prisma em movimento [em relação ao éter] equivale à refração sobre um prisma em repouso, isso se a precisão limita-se a primeira aproximação em  $v/c$ . A partir dessa equivalência Fresnel explica o resultado nulo encontrado por Arago em sua experiência em de 1810. A aproximação embutida na demonstração de Fresnel não causava nenhum problema, pois a precisão experimental da época não podia fornecer valores de ordem superior.<sup>35</sup>

Para Fresnel, o observador também é arrastado pelo movimento da Terra, portanto, o prisma utilizado no experimento, também está em movimento provocando outro efeito de aberração. Tal aberração anula os demais efeitos e explica o resultado nos experimentos.<sup>36</sup>

A teoria de Fresnel previa que experimentos ópticos terrestres envolvendo aberração, reflexão e refração não apresentariam efeitos mensuráveis devido ao movimento da Terra através do éter, porque haveria um cancelamento de diversos efeitos. Apesar do sucesso que a teoria de Fresnel obteve em explicar o resultado de alguns experimentos, ela era extremamente complexa, e, na década de 1840, persistiam alguns problemas com relação à velocidade de propagação da luz em diferentes meios. Stokes já havia feito uma demonstração dessa consequência. 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).<sup>37</sup>

É claro que muitas perguntas permanecem não respondidas: até que ponto a teoria do éter de Fresnel era coerente com os demais aspectos da óptica ondulatória da época? Por exemplo: Para permitir a propagação de ondas transversais, compatíveis com os fenômenos de polarização, o éter deveria ter propriedades semelhantes às de um sólido elástico. Até que ponto isso pode ser conciliado com o raciocínio do arrastamento parcial do éter por sólidos transparentes, que se baseia em uma analogia com gases? Ou ainda: De que modo se desenvolveu a idéia de que vários efeitos ópticos devidos ao movimento da Terra através do éter se cancelariam e tornariam esse movimento inobservável – pelo menos em primeira ordem?

É possível que não tenha havido um consenso, já que essa idéia seria contra-intuitiva na época, pois nada parece impedir, *a priori*, que se meça a velocidade da Terra em relação a um ente físico que parecia existir – o éter; assim, supomos que houve resistências a esse tipo de idéia, e que vários dos autores que procuraram realizar experimentos ópticos no período não a aceitavam. Então, até que ponto os experimentos e argumentos teóricos apresentados pelos autores da época poderiam ser considerados conclusivos, pelos seus contemporâneos? Responder a essas questões exige uma reflexão mais profunda na documentação do período, mas não

<sup>35</sup> Oliveira, 1993, p.167. Veja a justificativa completa nas p. 167-168.

<sup>36</sup> Oliveira, 1993, p. 168.

<sup>37</sup> Whittaker, 1953, p. 114.

podemos negar que a teoria de Fresnel teve grande sucesso na explicação e previsão dos resultados obtidos nos experimentos realizados.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentamos a análise de alguns autores a respeito das explicações científicas e adotamos alguns aspectos destes estudos como premissas para nossa proposta:

1) Um debate no âmbito da filosofia da ciência questiona se a ciência descreve ou explica os fenômenos naturais; 2) Explicar uma regularidade geral é sub-sumí-la a outra regularidade mais abrangente, a uma lei mais geral; 3) O sucesso de uma explicação está vinculado à sua capacidade de produzir um sentimento de entendimento no interlocutor; 4) A capacidade de explicação de uma teoria está vinculada a fatores que cada época considera satisfatórios; 5) A introdução de entes inobserváveis na ciência é um recurso útil para a construção de modelos científicos substanciais; 6) A modelização de teorias têm sido um dos recursos adotados no ensino de ciências na tarefa de fornecer explicações; 7) O educador necessita compreender o estatuto epistemológico do conhecimento científico para fundamentar sua prática docente.

Sob esta perspectiva, propusemo-nos a estudar um episódio histórico do século XIX que trata dos experimentos ópticos para detectar o movimento da Terra em relação ao éter. No período, várias teorias foram elaboradas e muitos experimentos realizados com o objetivo de explicar alguns fenômenos. A teoria de Fresnel era uma proposta tanto qualitativa quanto quantitativa e ofereceu uma boa possibilidade de explicação, embora também apresentasse algumas limitações. O éter foi um ente inobservável introduzido na teoria que permitiu a construção de um modelo científico, mas também foi utilizado em teorias concorrentes que buscavam explicar um mesmo fenômeno. Havia um problema a ser resolvido e o cenário que se apresentava era extremamente complexo: mais de um século de debate entre as teorias ondulatória e corpuscular da luz; vários séculos de observações astronômicas e possibilidades de explicação distintas, além da disputa entre os cientistas que defendiam posições diferentes.

Perceber essa ciência construída por muitos, a partir de erros e acertos, de inúmeros experimentos e das idéias que vão amadurecendo e se estruturando ao longo do tempo contribui para a compreensão do estatuto epistemológico do conhecimento científico. Tal entendimento contribui para o educador lidar de maneira crítica com a transposição didática, percebendo, antes de tudo, que não existe resposta definitiva na ciência e o debate entre teorias é um dos inúmeros fios que compõem a rica teia do saber, imaginada e criada pela mente humana.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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**: 38-49, 1853.
- BREWER, W. *et al.* Explanation in scientists and children. **Minds and Machines**. **8**: 119-136, 1998.
- BUCHWALD, J.Z. The battle between Arago and Biot over Fresnel. **Journal of Physics**, **20**: 109-117, 1989.
- COLINVAUX, D. (org.) **Modelos e Educação em ciências**. Rio de Janeiro: Ravil, 1998.

- CONCARI, S. B. Las teorías y modelos em la explicación científica: implicancias para la enseñanza de las ciencias. **Ciência & Educação**. **7**: 85-94, 2001.
- CUPANI, A. & PIETROCOLA, M. A relevância da epistemologia de Mario Bunge para o ensino de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. **19**: 100-25, 2002.
- CUSTÓDIO, J.F; PIETROCOLA, M. **Explicação Científica e Entendimento**. In: VI Congreso Latinoamericano de Historia de la Ciencia y la Tecnologia, 2004, Buenos Aires. (no prelo).
- 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** (286): 57-66, 1818.
- GILBERT, J. K. & BOULTER, C.J. Models in explanations, Part 1: horses for courses. **International Journal Science Education**. **20** (1) 83-97, 1998a.
- \_\_\_\_\_. Models in explanations, Part 2: Whose choice? Whose ears? **International Journal Science Education**. **20** (2): 187-203, 1998b.
- \_\_\_\_\_. **Developing Models in Science Education**. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 2000.
- HARRÉ, Rom. **As Filosofias da ciência**. Lisboa: Edições 70, 1988.
- HEMPEL, C. G. Explicação científica. In: **Filosofia da ciência**. MORGENBESSER, S. (org.). São Paulo: Cultrix, 1979.
- MARTINS, R. A . Em busca do nada: considerações sobre os argumentos a favor do vácuo ou do éter. **Trans/Form/Ação**. **16**: 7-27, 1993.
- MAYARGUE, A. Fresnel end optical ether. **La Recherche**, **21** (218): 234-237, 1990.
- MOREIRA, M. A . Modelos mentais, in MORTIMER, E. F. & SMOLKA, A. L. B. (orgs) **Linguagem, cultura e cognição – reflexões para o ensino e a sala de aula**. Belo Horizonte: Autêntica, 2001.
- NERSESSIAN, N.J. Aether/or: The Creation of Scientific Concepts. **Studies in the History and Philosophy of Science**, **15**: 175-212, 1984.
- OLIVEIRA, M. P. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. **10**(2): 157-172, 1993.
- PEDERSEN, K. M. Roger Boscovich and John Robison on terrestrial aberration. **Centaurus**, **24**: 335-345, 1980.
- PIETROCOLA, M. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, **10**(2): 157-172, 1993.
- \_\_\_\_\_. Construção e Realidade: o realismo científico de Mário Bunge e o ensino de ciências através de modelos. **Investigações em ensino de ciências**. **4** (3), dez. 1999.
- \_\_\_\_\_. **Construção e Realidade: o papel do conhecimento físico no entendimento do mundo**. Ensino de Física: conteúdo, metodologia e epistemologia numa concepção integradora, in Pietrocola, M. (org). Editora da UFSC/INEP, Florianópolis, 2001.
- STEWART, A. B. The Discovery of Stellar Aberration. **Scientific American**, **210**(3):100-107, 1964.
- STRAWSON, P. F. **Análise e metafísica. Uma introdução á filosofia**. Trad. Armando Mora de Oliveira. São Paulo: Discurso editorial, 2002.
- WEINBERG, S. Can science explain everything? Anything? **The New York Review of Books**. **48** (9), 2001. Disponível em: [www.nybooks.com/articles/14263](http://www.nybooks.com/articles/14263) , acessado em 10/06/05.

Trad. Brasileira de José Marcos Macedo. **Os limites da explicação científica**. Disponível em: [www.cfh.ufsc.br/~wfil/limit.htm](http://www.cfh.ufsc.br/~wfil/limit.htm) . Acessado em 10/06/05.

WHITTAKER, E.T. A history of the theories of aether and electricity. London: Nelson, 1953. 2 vols.

WORRAL, J. How to remain (reasonably) optimistic: Scientific realism and the “Luminiferous Ether”. **Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association**, Volume one: Contributed Papers, p. 334-342, 1994.