

## **Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz.**

Maurício Pietrocola de Oliveira  
Dept. de Física - UFSC\*

### **Introdução**

Durante algum tempo a natureza da luz foi uma questão de controvérsia. Sem remontar até a antigüidade, Huygens, Newton e Descartes debatiam sobre a origem dos fenômenos luminosos, propondo explicações apoiadas em bases conceituais bem diferentes. Enquanto Descartes e Huygens pronunciavam-se pela natureza imaterial da luz, Newton defendia tese contrária. Para Descartes, a luz era uma tendência ao movimento ou pressão que se transmitia com rapidez infinita. Huygens descrevia a luz como perturbações que se propagavam num fluído universal nomeado éter, em analogia ao som. Newton, por sua vez, acreditava na natureza corpuscular da luz, supondo a mesma composta por partículas luminosas que se propagavam no espaço com grande velocidade. No tocante à propagação da luz, Newton e Huygens defendiam concepções do mesmo tipo, atribuindo uma velocidade de transmissão finita à mesma. Era, por exemplo, baseado em mudanças na velocidade de propagação dos raios luminosos que ambos explicavam a refração

Medidas efetuadas por Röemer em 1675 mostraram que atrasos nas aparições dos satélites de Jupiter durante eclipses podiam ser explicados pelo tempo adicional gasto pela Luz para percorrer o diâmetro da órbita terrestre. Através dessa medida Roëmer pôde estimar a velocidade de propagação da luz e fornecer uma forte evidência contra a hipótese cartesiana. O fenômeno de aberração das estrelas fixas, observado por Bradley em 1725, corroborou tais resultados indicando que a luz levava um tempo finito para atingir a Terra, vindo das estrelas.<sup>1</sup>

Durante vários anos, Huygens e Newton aperfeiçoaram seus respectivos modelos, tentando interpretar corretamente os fenômenos luminosos. Em grande parte devido a capacidade do modelo newtoniano em interpretar corretamente vários fenômenos luminosos, este afirmou-se como concepção científica quase hegemônica nos séculos XVII e XVIII, relegando pouco espaço nas pesquisas para trabalhos fundamentados na visão ondulatória de Huygens. Vários sucessos obtidos pelo modelo newtoniano da luz, associado à notoriedade obtida pela teoria da gravitação universal nos anos subseqüentes a sua proposição fizeram com que o modelo corpuscular da luz se tornasse quase hegemônico nos séculos XVII e XVIII.

---

\* Bolsista recém-doutor pelo CNPq.

<sup>1</sup>-Detalharemos esse fenômeno nas páginas seguintes.

## Luz e Movimento

Entre os resultados experimentais que corroboravam a teoria luminosa na visão de Newton encontrava-se uma observação sobre a posição das estrelas fixas, executada por Bradley em 1729. Bradley propondo-se a medir o fenômeno de paralaxe<sup>2</sup> astronômica das estrelas fixas, percebe uma pequena variação na posição da estrela Gama da constelação do Dragão quando as observações eram feitas entre 1725 e 1726. A observação desse efeito não concordava com as previsões tiradas da paralaxe. Bradley explica o fenômeno propondo que a modificação observada era causada pela composição do movimento de translação da Terra. Esse fenômeno recebeu o nome de aberração das estrelas fixas<sup>3</sup>.

Antes de continuar nossas considerações históricas sobre a questão, vejamos as diferenças entre o fenômeno de aberração e de paralaxe.

### Aberração X Paralaxe.

A paralaxe e a aberração são fenômenos causados pelo movimento anual da Terra quando observações astronômicas são feitas. Apesar dessa origem comum, esses dois fenômenos não são iguais, produzindo efeitos diferentes sobre as observações.

#### A. Paralaxe

Na figura abaixo, a estrela E é observada sob ângulo  $Z_1$  em relação ao Zênite, enquanto que a Terra está na posição  $P_1$  de sua órbita. Seis meses após, esta mesma estrela será observada sob ângulo  $Z_2$  enquanto que a Terra encontra-se em  $P_2$ . A diferença na medida de posição dessa estrela, suposta imóvel, em função da posição da Terra na sua órbita é o fenômeno de paralaxe. O ângulo  $\pi$  é o ângulo de paralaxe. Através desse último, é possível determinar a distância da estrela ao Sol. Observemos no entanto que a figura 1 exagera a diferença entre  $Z_1$  e  $Z_2$ . A distância das estrelas à Terra sendo muito grande, o ângulo  $\pi$  não ultrapassa 1" de arco.

---

<sup>2</sup>-Pequena variação na posição das estrelas fixas causada pela mudança de posição da Terra na sua órbita.

<sup>3</sup>- Veja no apêndice, figura com as variações causadas pela aberração e paralaxe.

### figura 1

É importante observar que no esquema representado, durante a progressão da Terra de  $P_1$  para  $P_2$  na sua órbita, a posição aparente da estrela observada da Terra varia continuamente para o "norte" celeste (figure 2).

### figura 2

#### B. Aberração.

Na figura abaixo, a mesma estrela  $E$  é observada a partir da Terra. Na posição  $P_1$  e  $P_2$ ,  $u_1$  e  $u_2$  representam as direções do deslocamento terrestres. A propagação da luz não sendo instantânea, a direção na qual a estrela é observada varia devido ao deslocamento da Terra no espaço<sup>4</sup>. O instrumento de observação deve estar dirigido não para a direção  $EP_1$ , mas segundo a direção  $E'_1P_1$  para levar em conta o movimento terrestre (figura 4). O ângulo entre  $EP_1$  e  $E'_1P_1$  ( $\theta$ ) é o ângulo de aberração.

### figura3

A posição  $E'_1$  é obtida compondo-se a direção de propagação da luz emitida pela estrela na direção  $EP_1$  e a velocidade ( $u$ ) de translação da Terra (figure 5 ).

---

<sup>4</sup>- Esta explicação esta fundada sobre uma concepção clássica da luz. Na concepção relativística, explica-se esse fenômeno de outro jeito.

**figura 4****figura 5.**

A variação na observação devido ao fenômeno de aberração é diferente daquele devido à paralaxe. Enquanto que nessa última, as posições aparentes da estrela variam, entre a posição  $P_1$  e  $P_2$  no plano  $P_1EP_2$ , no fenômeno de aberração a posição aparente varia no plano perpendicular a este  $P_1EE'_1$ .

**Interpretação ondulatória.**

De certa maneira, pode-se afirmar que dentro da visão corpuscular da luz, um fenômeno como a aberração não deveria causar muita estranheza no meio científico da época, pois a variação da trajetória de um corpo em função do movimento relativo do observador ao mesmo era algo proposto já por Galileu e amplamente aceito na época de Bradley. Ao supor-se a luz constituída por pequenos corpúsculos de matéria, supunha-se implicitamente que o comportamento dos mesmos seria regido pelas leis da mecânica. Assim a constatação do efeito de aberração das estrelas evidenciou uma consequência possível, mas não esperada da teoria corpuscular da luz: a propagação luminosa podia ser influenciada<sup>5</sup> pelo movimento dos corpos ponderáveis<sup>6</sup>.

O mesmo fenômeno de aberração analisado a partir da teoria luminosa de Huygens, onde a luz é entendida como propagação de pulsos num meio etérico coloca alguns problemas para sua interpretação. A dedução do efeito observado não podia vir diretamente da teoria, sendo uma hipótese adicional necessária: devia-se supor o éter totalmente imóvel no espaço e não influenciado pelo movimento da Terra. Esta hipótese foi proposta por Young em 1804.<sup>7</sup> Para tanto ele apresentou uma analogia para expor sua proposta:

Considerando-se o fenômeno da aberração das estrelas, eu estou pronto a acreditar que o éter luminoso penetra a substância de todo corpo material com pouca ou nenhuma resistência, talvez tão livre quanto o vento passe através de um bosque de árvores.<sup>8</sup>

<sup>5</sup>-Entenda-se aqui "influenciada" no sentido genérico da palavra, sem nenhuma conotação a influência do tipo gravitacional ou outra.

<sup>6</sup>-Nós definimos aqui os corpos como "ponderáveis" em oposição a outro tipo de matéria, o éter, considerado na época também como matéria, mas impoderável.

<sup>7</sup>- Young (1804).

<sup>8</sup>-"Upon considering the phenomena of the aberration of stars, I am disposed to believe that the luminiferous aether pervades the substance of all material bodies with little or no resistance, as freely perhaps as the wind passes through a grove of trees". Young (1804), p. 1. Traduzido por mim MPO.

Supondo que o éter não é perturbado pelo movimento da Terra, vale a composição entre a velocidade de propagação da luz e a velocidade de translação terrestre. Sendo o éter completamente fixo no espaço, a propagação de um pulso luminoso equivale, para fins de composição de velocidades, a um corpúsculo móvel.

Vale a pena frisar que a grande separação temporal entre a observação de Bradley (1728) e a interpretação de Young (1804) dentro da visão ondulatória deve-se ao fato de durante esse período de tempo ser praticamente inexpressível os trabalhos em óptica elaborados dentro da tradição de Huygens. Uma das poucas exceções foi, porém, Euler, que, no século XVIII, discute, entre outras coisas, o fenômeno de aberração segundo o modelo ondulatório da luz. A resistência a esse tipo de trabalho era muito grande, e os próprios trabalhos de Young foram fortemente criticados na Inglaterra por partidários da teoria corpuscular que dominavam o cenário científico da época.

No final do século XVIII e início do século XIX é o programa de Laplace que mais desenvolve a teoria da luz na visão newtoniana. Laplace acreditava que todo fenômeno físico poderia ser interpretado dentro da concepção newtoniana de partículas interagindo através de forças centrais. Ele supunha que a refração, a coesão dos sólidos, a capilaridade e as reações químicas resultavam da ação de forças de pequena ação entre partículas da matéria. Seu objetivo era trazer o estudo dos fenômenos terrestres à perfeição das leis da mecânica celeste. Laplace enfatizava a união entre diversos fenômenos físicos e propunha um método capaz de explicá-los a partir de uma base conceitual comum.

Dentro desse programa, Laplace e seus colaboradores conseguiram precisar a descrição de fenômenos luminosos já existentes, como a dupla refração, e propor outras mais ou menos rigorosas como a polarização. Seguindo instruções de Laplace, Biot e Arago foram levados a resolver um problema trazido à teoria corpuscular pela observação sistemática do fenômeno de aberração: ainda que a base do fenômeno de aberração fosse compatível com a visão newtoniana (composição de velocidades), a observação de vários corpos celestes fornecia valores iguais para o ângulo de aberração, implicando que a velocidade de propagação da luz no espaço seria constante. Essa consequência tirada das observações era a princípio incompatível com a teoria corpuscular, visto que dentro da visão newtoniana, a velocidade de propagação dos corpúsculos de luz no espaço deveria depender das dimensões e distância dos corpos emissores.

Em se tratando de medidas muito delicadas, inicialmente Biot e Arago propõem-se a verificar se realmente não existia diferença nas velocidades da luz

emitida por diversos astros. Tal verificação é feita em 1806 pelos dois cientistas franceses através da medida da refração da luz de vários corpos celestes. Seus resultados são apresentados à *Academia de Ciências de Paris*, confirmando a constância da velocidade da luz e mantendo a incompatibilidade com a teoria. Numa publicação posterior, Arago escreve que "a luz move-se com a mesma velocidade, quaisquer que sejam os corpos de onde ela emana, ou que ao menos, se existem algumas diferenças, elas não podem, de nenhuma maneira alterar a exatidão das observações astronômicas"<sup>9</sup>.

A segunda série de experiências realizadas em 1810, desta vez executadas somente por Arago, tentou evidenciar o "princípio de Newton" que na refração uma desigualdade no desvio significa a existência de uma desigualdade na velocidade da luz. Essa verificação poderia mostrar que a constância na aberração podia ser fruto de uma compensação entre a variação da velocidade da luz e a forma dos desvios produzidos na refração.

Para instrumentalizar essa verificação, Arago vale-se do fato que o movimento da Terra podia ser composto com a velocidade da luz para produzir variações na velocidade relativa medida num prisma terrestre. O movimento de translação possuindo a maior velocidade que se podia obter, produziria efeitos experimentais da ordem de  $10^{-4}$  ( $v/c$ ). Segundo Arago, essa variação apesar de pequena poderia ser detectada pelos aparelhos da época, e mostraria de maneira indiscutível se uma variação na velocidade da luz medida sobre um prisma produziria modificação nos desvios da mesma.

Vejam os detalhes a proposta experimental de Arago. Para tanto, vamos supor a figura abaixo que esquematiza a montagem elaborada por ele:

Na figura a um prisma sobre a Terra aproxima-se de uma estrela. Nesse caso a velocidade da luz dentro do meio que compõe o prisma é acrescida da velocidade da Terra. Na outra figura, toma-se uma estrela numa posição diametralmente oposta, de maneira que nesse caso a velocidade seria subtraída da velocidade da Terra. Essas duas situações deveriam fornecer desvios angulares diferentes, sendo o ângulo medido na situação a maior que aquele medido na situação b.

---

<sup>9</sup>-Arago (1853), p.40.

Executando a experiência, Arago depara-se com um "incrível" resultado nulo, observando que os desvios nas duas situações eram exatamente iguais.

Se a expectativa de Laplace com esses trabalhos era obter respostas a alguns problemas aos quais a teoria newtoniana fazia face no início do século XIX, pode-se dizer que a empreitada de Arago e Biot não foi das mais felizes, pois além de não trazer nenhuma solução ao problema da constância da velocidade da luz inferida das observações da aberração, ela ainda acrescentou um novo problema ao "princípio de refração" newtoniano. Os resultados encontrados por Arago e Biot negavam a primeira vista consequências imediatas da teoria corpuscular. Esses resultados podem ser resumidas assim:

a) a experiência de 1806 confirma as inferências feitas através das medidas da constante de aberração de que a velocidade da propagação da luz emitida por diferentes corpos celestes é constante e independente das características dos mesmos;

b) na experiência de 1810, uma variação na velocidade da luz produzida pela adição/subtração da velocidade orbital da Terra não mostrou uma variação no ângulo de refração. Esse resultado constitui-se numa nova incompatibilidade à teoria newtoniana.

Essas experiências revelaram um elo fraco na teoria corpuscular. Nas situações onde existia uma importante influência do movimento dos corpos ponderáveis (como é o caso do fenômeno de aberração das estrelas e da experiência de Arago de 1810), a teoria não era capaz de fornecer uma boa interpretação para o comportamento da luz. Se esse problema não era suficiente para demolir a visão corpuscular da luz proposta por Newton, contudo ele contribuiu para que uma brecha fosse feita na sua credibilidade, dando oportunidade para que Fresnel explicasse esses mesmos resultados dentro de uma visão ondulatória da luz, promovendo um avanço importante para o renascimento (em outros moldes) da teoria luminosa de Huygens.

## **Fresnel e a interpretação ondulatória.**

Talvez consciente da situação precária na qual encontrava-se a teoria corpuscular em relação a esses fenômenos, Arago escreve a Fresnel para indagar se seria possível conciliar os resultados da aberração e de suas experiências dentro de uma visão ondulatória da luz.

Como já mencionado anteriormente, Young em 1804 havia proposto uma hipótese para interpretar o fenômeno de aberração. Sua concepção de que a Terra seria transparente ao éter prestava-se bem à explicação do desvio na posição das estrelas devido ao efeito do movimento de translação (fenômeno de aberração) e ao fato desse desvio ser constante para todos os corpos celestes, 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. Porém a Fresnel coube a tarefa de conciliar a essa interpretação, o resultado da experiência de Arago de 1810, na qual a adição/subtração do movimento orbital terrestre parecia não interferir na medida da refração.

Dentro da suposição de um éter imóvel e indiferente ao movimento dos corpos, como Young havia proposto, não seria possível explicar o resultado da experiência de Arago de 1810. Para tanto, o mais simples seria supor o comportamento do éter em relação à matéria como sendo o oposto: se a Terra arrastasse consigo o éter que encontrava-se às suas vizinhanças ficaria claro o motivo que leva o prisma a indicar sempre o mesmo desvio, ora para uma estrela da qual a Terra se aproxima, ora para uma outra da qual a Terra se afasta. Nesse caso não haveria composição entre o movimento terrestre e o movimento da luz no éter. Porém dentro dessa nova concepção o fenômeno de aberração não seria interpretado.<sup>10</sup>

Aparentemente a explicação dos fenômenos de aberração e o resultado da experiência de Arago de 1810 necessitavam de suposições opostas sobre a relação entre éter e matéria: o resultado experimental de Arago em 1810 parecia reclamar um éter fixo a superfície da Terra, enquanto que a interpretação da aberração das estrelas devia ser interpretada através da hipótese que propunha a independência entre éter e os corpos materiais. Essa contradição aparente existente dentro da concepção do éter (tomada mecanicamente), aparece de forma explícita nos textos de Fresnel. Numa carta a Arago publicada em 1818, onde ele propõe uma resposta ao problema encontra-se o seguinte trecho: "se admiti-se que o nosso globo imprime seu

---

<sup>10</sup>-Essa concepção foi proposta mais tarde, na década de 1840, por Stokes. Baseado numa visão que supunha que o éter luminoso encontrava-se "colado" à matéria, e compartilhando integralmente seu movimento, Stokes consegue conciliar as interpretações dos fenômenos de aberração e o resultado da experiência de Arago de 1810. A hipótese de Stokes implica em certas condições dinâmicas entre o arrastamento do éter, e Lorentz em 1887 demonstra que essas condições são incompatíveis entre si. o leitor pode aprofundar o assunto em Wilson (1972).

movimento ao éter que o envolve, conceber-se-ia facilmente por que o mesmo prisma refrata sempre a luz, qualquer que seja o lado de onde ela chega. Mas parece impossível explicar a aberração das estrelas nessa hipótese ..."<sup>11</sup>

Levando-se em consideração tal fato, fica claro que a missão de Fresnel não era substancialmente mais fácil que aquela de Laplace. Interpretar os fenômenos da luz levando-se em conta a influência do movimento dos corpos era uma tarefa complicada para ambas as visões, corpuscular e ondulatória.

A contradição desaparece da teoria ondulatória quando Fresnel, nessa mesma carta endereçada a Arago, consegue conciliar o fenômeno de aberração com os resultados da experiência de 1810. Fresnel, embora desconhecendo a hipótese de Young, propôs uma outra muito próxima a esta que, guardando a imobilidade do éter no espaço, supunha que uma pequena parte deste éter era arrastado pelos corpos transparentes em movimento com a Terra. Neste caso, os dois fenômenos podiam ser interpretados pela teoria ondulatória. Fresnel expõe sua hipótese da seguinte maneira: "...até agora eu só pude conceber claramente este fenômeno supondo que o éter passa livremente através do globo e que a velocidade comunicado a este fluido é somente uma pequena parte daquela da Terra; não excede o centésimo por exemplo."<sup>12</sup>

Essa proposição de Fresnel ficou conhecida como **hipótese de arrastamento parcial do éter luminoso**.

Na verdade a interpretação da experiência de 1810 era apenas aproximada, isso é, a igualdade entre a refração nos dois casos estudados por Arago só valia na primeira aproximação em  $v/c$  (onde  $v$  é a velocidade orbital da Terra e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo), aproximação essa compatível com a precisão experimental da época. Porém esse resultado foi da maior importância para o progresso da teoria ondulatória. O fato desses dois fenômenos terem sido conciliados dentro de uma visão ondulatória da luz dá-lhe sustentação face a esmagadora aceitação de que dispunha a teoria corpuscular na época, promovida por Laplace e seus seguidores.

A pequena influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz no éter fixo fazia toda a força da hipótese proposta por Fresnel. Era esse efeito que permitia a explicação da invariância da leis da refração em corpos em movimento, deduzida das experiências de Arago de 1810. Para tanto, Fresnel quantificava a forma pela qual o movimento do corpo influenciava a velocidade de propagação da luz dentro do

---

<sup>11</sup>-Fresnel (1818), p. 58. Traduzido por mim MPO.

<sup>12</sup>-*Ibid*, p. 58. Traduzido por mim MPO.

mesmo. Seguindo as ideias proposta por Huygens, Fresnel admite que o éter no espaço livre de qualquer corpo material teria uma densidade constante  $\mathbf{d}$ . Os corpos refringentes teriam uma concentração maior de éter no seu interior  $\mathbf{d}'$ , isso explicando a capacidade dos corpos em desviar os raios luminosos. Ao moverem-se, os corpos carregariam consigo uma parte do éter contido no seu interior, justamente o excesso de éter que possuiriam em relação ao mesmo volume no espaço vazio. Esse "éter transportado" era responsável por uma variação na velocidade da luz dentro do corpo.

A partir dessas considerações e supondo o éter como um fluído elástico (o que permite dizer que as densidades dos meios estão na razão inversa dos quadrados da velocidades de propagação das ondas nos mesmos) Fresnel deduz uma fórmula para calcular a variação da velocidades de propagação das ondas luminosas dentro de um corpo transparente em movimento. A dedução parte das seguintes ideias:

1)  $\mathbf{n} = \mathbf{c}/\mathbf{v}$  (definição do índice de refração relativo de um meio qualquer em relação ao espaço vazio);

2) a relação acima mencionada entre densidade e velocidade de propagação permite-nos escrever  $\mathbf{d}'/\mathbf{d} = \mathbf{n}^2$ ;

3) O movimento do corpo carrega uma parte do éter igual a diferença de densidades  $\mathbf{d}_e = (\mathbf{d}' - \mathbf{d})$ ;

A diferença de densidades pode ser rescrita considerando-se a relação no item 2 como  $\mathbf{d}_e = (\mathbf{n}^2 - \mathbf{1})\mathbf{d}$ .

A velocidade de uma onda luminosa que se propaga num meio móvel é aumentada/diminuída de um fator baseado na quantidade de éter arrastada pelo meio:

se todo o éter de densidade  $\mathbf{d}'$  no interior do corpo fosse arrastado a velocidade da onda luminosa seria aumentada/diminuída de toda velocidade do corpo ( $\mathbf{v}$ ); como apenas uma parcela desse éter ( $\mathbf{d}' - \mathbf{d}$ ) é arrastada a velocidade acrescida/subtraída seria a incógnita a calcular nessa regra de três. Desse cálculo chega-se ao valor  $(\mathbf{1} - \mathbf{1}/\mathbf{n}^2)\mathbf{v}$ , que é o dito "coeficiente de arrastamento parcial do éter" proposto por Fresnel.

Supondo-se que um corpo de índice de refração  $\mathbf{n}$  e velocidade  $\mathbf{v}$  se mova como na figura abaixo,

a velocidade de propagação de uma onda luminosa no interior de tal corpo será dada pela fórmula:

$$c \pm (1 - 1/n^2).v \qquad \text{eq. 1}$$

onde o sinal  $\pm$  representa a coincidência ou a não dos sentidos dos movimentos do corpo e da onda.

Com o uso dessa fórmula, Fresnel mostrou que a refração processada sobre um prisma em movimento<sup>13</sup> 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 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. Vejamos como isso se dá.

Fresnel elabora sua demonstração geometricamente, onde o desenho abaixo é usado como base para o cálculo.

(desenho tese pag 286)

**figure 1**<sup>14</sup>

O prisma em questão, em repouso em relação ao éter, tem o lado **EF** perpendicular aos raios incidentes e ao plano da eclíptica (da órbita da Terra). Os raios incidentes **LA, LB** estão na direção do movimento do prisma ( ou do movimento

<sup>13</sup>-O movimento do prisma é considerado em relação ao éter.

<sup>14</sup>-Figure dans le texte de Fresnel de 1818.

terrestre). A reta **DC** representa a superfície de onde e **BC** a direção do raio luminoso saindo do prisma. A reta **AB** é a superfície de onda no interior do prisma. Para determinar a direção do raio refratado, deve-se impor que a luz percorrerá a distância **AD** no mesmo intervalo de tempo que **BC**. A relação **AD/BC** determina a direção de propagação desse raio, no caso em que o prisma está em repouso em relação ao éter.

Entretanto se o prisma estiver em movimento, o ponto **D** desloca-se em **D'**, o que  aumenta a relação entre o caminho percorrido no interior do prisma e fora do mesmo. O deslocamento poderia mudar o ângulo do raio refratado.

Considerando-se somente o deslocamento do prisma e supondo o éter ainda em repouso, a nova direção do raio refratado **BC'** obedeceria a uma lei de refração diferente daquela de Snell-Descartes. Na verdade, a busca desta variação na lei de refração constituiu o objetivo da experiência de Arago de 1810. Esta modificação aparente da lei seria um tipo de efeito de aberração, aberração aqui compreendida num sentido mais amplo daquele empregado para o fenômeno de aberração das estrelas, sugerindo uma modificação qualquer no comportamento dos fenômenos luminosos. Assim, nessa concepção mais ampla, a aberração das estrelas observadas por Bradley seria um efeito de aberração causado pelo deslocamento do observador (ou da luneta de observação), resultando numa modificação na posição da estrela. O deslocamento do prisma seria igualmente um tipo de aberração, o efeito seria a modificação do ângulo de refração. De uma maneira geral, o movimento das partes de um sistema óptico produziria efeitos de aberração, que modificariam as características dos fenômenos observados em relação a situação imóvel. Esse fenômeno introduz efeitos da ordem de  $v/c$  na observação.

É importante notar que o desvio do raio refratado para a direção **BC'** é produzido simplesmente pelo fato do prisma estar em movimento. Nessa situação supôs-se sempre que o éter no qual as ondas luminosa propagavam-se encontrava-se em repouso e não era modificado pelo movimento do prisma. Dessa forma, a refração da onda luminosa na direção **BC'** seria uma consequência da aplicação da hipótese de Young de um éter imóvel e completamente independente do movimento dos corpos materiais.

Contudo, na suposição de Fresnel o movimento do corpo causa uma ligeira modificação no estado de movimento do éter no seu interior. Esse efeito produziria uma pequena modificação na velocidade de propagação da luz no interior do prisma em questão, exprimida pela fórmula de velocidade acima citada (eq.1). Considerando este novo efeito do movimento do prisma, a direção do raio refratado **BC'** sofre uma pequena modificação da ordem de  $v/c$ . Nesse caso o ângulo **CBC'** que define a

modificação entre a refração num prisma em repouso (**BC**) para um outro em movimento (**BC'**) é:

$$\sin i' \cos i - \sin i \dots c \quad \text{eq. 2}^{15}$$

Se as considerações de Fresnel sobre a questão tivessem parado por aqui, considerando apenas a influência do movimento do prisma na forma da mudança de posição e na variação da velocidade de propagação da luz no seu interior devido ao arrastamento do éter, teria sido legítimo esperar que uma variação na lei de refração fosse detectada pela experiência. O ângulo **CBC'**, dado pela fórmula acima, corresponderia à modificação a ser observada na direção do raio refratado. As leis de refração escreveriam-se diferentemente no caso dos meios em movimento. Essa nova forma da lei seria o resultado da modificação da velocidade de propagação do raio luminoso no meio refringente e do aumento no caminho percorrido pelo raio no interior do mesmo. Todavia, Fresnel chamou atenção para o fato que nesse tipo de fenômeno o observador também é arrastado pelo movimento da Terra. A luneta utilizada na observação do raio refratado estaria em movimento e introduziria outro efeito de aberração na experiência. O extraordinário nesse caso é que a hipótese proposta por Fresnel faz com que os dois efeitos descritos acima, resultantes do movimento do prisma, sejam compensados por esse terceiro causado pelo deslocamento do luneta de observação. É exatamente essa nova consideração, que Arago não considerava na sua interpretação do problema, que permitiu a Fresnel explicar o resultado negativo encontrado na experiência.

Assim, a aberração causada pelo movimento do observador compensa a modificação esperada na direção do raio refratado pelo prisma em movimento. A hipótese de Fresnel permite que o efeitos do movimento do prisma e da luneta de observação sejam numericamente iguais quando tomados na primeira ordem de aproximação em  $v/c$ .

### **Críticas a hipótese de um éter parcialmente arrastado.**

Apesar do grande avanço aportado à interpretação dos resultados experimentais pela inclusão da hipótese de Fresnel do arrastamento parcial do éter, este era criticável sob diversos aspectos. O próprio Fresnel, e após ele Fizeau<sup>16</sup>, Mascart<sup>17</sup>, Lorentz<sup>18</sup> e

<sup>15</sup>-Fresnel (1818), p. 63. Nós substituímos a notação empregada no artigo original.

<sup>16</sup>-Fizeau(1851).

<sup>17</sup>-Mascart(1873).

<sup>18</sup>-Lorentz (1887).

outros expressaram em vários momentos que o arrastamento parcial do éter não podia ser completamente incorporado às bases mecânicas da teoria ondulatória da luz. Fresnel expõe a fragilidade de sua hipótese face a problemas de natureza mecânica desta maneira: a expressão  $v \cdot (1 - 1/n^2)$  deve ser considerada como "representando o arrastamento das ondas luminosas, mas não deve-se "dar uma importância literal ao raciocínio que conduz a esta fórmula", pois "não é possível que a fração do éter arrastado seja uma função do comprimento de onda"<sup>19</sup>.

A crítica do próprio Fresnel baseava-se no fato que sua hipótese apoiava-se no arrastamento do excesso de éter existente nos corpos. Como a quantidade de éter presente nos corpos materiais de acordo com sua dedução dependia do índice de refração<sup>20</sup>, isso significava que o corpo arrastaria consigo uma quantidade de éter variante com o comprimento de onda propagada. Esse problema mostra que a base mecânica que sustentava a hipótese do arrastamento parcial do éter apresentava incoerências, daí o apelo de Fresnel para que não fosse dada uma importância literal ao arrastamento do éter enquanto "substância", mas que se considerasse apenas o arrastamento das ondas luminosas, representado pela fórmula de velocidades.

Essa crítica à concepção mecânica da hipótese de Fresnel aparece de forma clara num texto de Mascart de 1889: "Assim como não podia-se admitir que a relação das densidades do éter dentro de um meio ponderável e no vazio fosse igual ao quadrado  $n^2$  do índice de refração e, conseqüentemente, variável com o comprimento de onda da luz, não é possível que a fração deste éter arrastado pelo movimento seja uma função do comprimento de onda"<sup>21</sup>.

Apesar de todos essas críticas à base mecânica da hipótese, esta mostrou-se compatível com diversos resultados experimentais. A mais importantes entre elas é talvez a célebre experiência de Fizeau de 1851, onde o cientista francês mede a velocidade de propagação da luz dentro de uma coluna de água em movimento. Essa experiência fora realizada com o objetivo de decidir entre as várias hipóteses existentes na época sobre o estado de movimento do éter luminoso nas proximidades de corpos ponderáveis em movimento. Ou seja, se o éter tomava parte ao movimento dos corpos de maneira completa, parcial, ou não era influenciado pelo mesmo. O resultado da experiência foi interpretado por Fizeau como sendo compatível apenas com as conseqüências tiradas da hipótese de Fresnel de um éter parcialmente

---

<sup>19</sup>- Fresnel, "Lettre d'Augustin Fresnel a monsieur Maritz", *Oeuvres complètes*, T.III, p. 199, 1823. Citado por Mayrargue (1991), p. 66. Traduzido por mim MPO.

<sup>20</sup>-Ver página 9.

<sup>21</sup>-Mascart (1889), T.III, p. 89. Traduzido por mim MPO. Na verdade esse mesmo tipo de comentário já está presente nos textos de Mascart de 1872 e 1874. Nós transcrevemos esta referência por motivos de síntese de idéias.

arrastado. Todavia Fizeau faz uma importante ressalva às conclusões que se pode tirar de sua experiência, e em que medida ela confirmava as ideias de Fresnel. Ele escreve: "O sucesso desta experiência parece-me resultar na adoção da hipótese de Fresnel, ou ao menos na lei que ele encontrou para exprimir a modificação da velocidade da luz pelo efeito do movimento dos corpos; pois ainda que esta lei achando-se verdadeira, e forneça uma prova muito forte em favor da concepção da qual ela é somente uma consequência, talvez a concepção de Fresnel parecerá tão extraordinária, e, sob algumas relações, tão difícil de admitir, que exigirá outras provas ainda e um exame aprofundado da parte dos geômetras (matemáticos), antes de adotá-la como a expressão da realidade das coisas".<sup>22</sup> Fizeau aceitou a fórmula de Fresnel como uma verdade estabelecida pela experiência, mas ainda duvidava da realidade descrita pela hipótese que lhe parecia "extraordinária".

Da mesma forma, Mascart exprimiu-se pela aceitação da fórmula e pela desconfiança da hipótese: "Os raciocínios e as hipóteses sobre as quais está baseada esta demonstração (da fórmula que quantifica a variação de velocidade na hipótese de um éter parcialmente arrastado) não estão livres de objeções, mas a fórmula parece ter um alto grau de probabilidade".<sup>23</sup>

Assim, durante o século XIX várias confirmações da fórmula de Fresnel foram sendo encontradas por Hoek em 1868, por Mascart em 1872 e 1874, por Airy no final desse século, etc, transformando a fórmula de velocidades de Fresnel num instrumento poderoso para a interpretação de fenômenos ópticos onde existia a influência do movimento dos corpos. As contradições mecânicas da hipótese que deu origem a essa fórmula fez com que sua utilização fosse tornando-se cada vez mais operatória, uma "regra" que prestava-se bem ao cálculo da velocidade da luz em meios transparentes móveis.

## Comentários Finais

A influência do movimento dos corpos sobre a propagação da luz teve uma trajetória variada e importante no desenvolvimento da física. Ela nasce no século XVIII dentro da visão newtoniana da luz, contribui para sufocá-la no início do século XIX ao mesmo tempo que impulsionou a visão ondulatória.

---

<sup>22</sup>-Fizeau (1851), p.355. Traduzido por mim MPO.

<sup>23</sup>-Mascart (1872), p. 160.

A interpretação desse tipo de fenômeno dentro da óptica ondulatória valeu-se durante todo o século XIX de uma hipótese mecanicamente incorreta. No entanto esta hipótese forneceu uma fórmula capaz de explicar todos os resultados experimentais na primeira ordem de aproximação em  $v/c$ , que no último quarto do século é incorporada pela teoria eletromagnética. Dentro do eletromagnetismo, a fórmula ganha com Lorentz, uma justificação teórica coerente com as noções de campo em corpos em movimento. A fórmula deixa de ser arbitrária e operatória para ganhar "status" de consequência teórica dos pressupostos básicos da teoria eletromagnética.

Nem o suposto fracasso dessa teoria em interpretar a famosa experiência de Michelson-Morley em 1886 diminui sua importância, pois ela é "reaparece" na Teoria da Relatividade Restrita de Einstein como a primeira aproximação em  $v/c$  da fórmula relativística de adição de velocidades.

A evolução da questão da influência dos corpos sobre a luz do século XVIII ao século XIX ilustra de forma bastante clara como os caminhos empregados pela ciência são variados e imprevisíveis. Certamente é interessante notar que Fresnel confronta-se com um problema impossível a resolver dentro da concepção científica de sua época. As incoerências que sua hipótese apresentava eram fruto dessa impossibilidade. Porém, como salienta Hoffmann, *é admirável o fato que Fresnel tenha resolvido (parcialmente) um problema que somente a chegada da relatividade permitiria tratar logicamente. Era preciso que ele tivesse capacidades excepcionais para obter conclusões tão brilhantes e tão ricas de perspectivas por vias tão suspeitas. A grande ciência transcende a lógica.*<sup>24</sup>

O que causa mais estranheza é o fato da hipótese do éter arrastado que dá origem a fórmula de Fresnel já nascer refutada, visto as incoerências de ordem mecânica, conhecidas mesmo por seu autor. Mesmo assim, este prefere não dar importância a este fato, atendo-se à fórmula que lhe parecia "boa" e sugerindo que a mesma poderia vir a ser justificada futuramente. Neste evento a "intuição física" de Fresnel parece ter falado mais alto, preservando o efeito em detrimento da causa. Fresnel tinha razão, pois o eletromagnetismo num primeiro momento, e a Relatividade mais tarde realizaram esta tarefa, mostrando os fundamentos teóricos de tal fórmula.<sup>25</sup>

<sup>24</sup>-Hoffmann, B. (1985), p.79. A palavra entre parênteses é adição minha.

<sup>25</sup>- O leitor poderá aprofundar a questão em Mayrargue (1991), Wittaker (1951), principalmente vol1, cap. 4, Tonnelat (1971), cap. 4, Hirose (1976) e Hoffmann (1985), principalmente cap. 4.

## Bibliografia.

**ARAGO (1853)** - "Memoire sur la Vitesse de la Lumière lu à la Première Classe de l'Institut, le 10 Décembre 1810". *CRAS*, vol. 53, 1853.

**HOFFMANN, B. (1985)** - "Histoire d'une grande idée, la relativité;" Pour la science, Paris

**FIZEAU (1851)**- "Sur les hypothèses relatives à l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur", *CRAS*, vol. 33, 1851, p. 349.

**FRESNEL, A.(1818)** - "Lettre d'Augustin Fresnel à François Arago, sur l'influence du mouvement terrestre dans quelques phénomènes d'optique", *Ann. Ch. Ph.*, 2° s., 1818; *Oeuvres complètes*, pag.627.

**HIROSIGE 1976)** - "The Ether Problem, The Mechanistic worldview and the Origins of The Theory of Relativity", *Hist. Studies in The Physical Sciences* , vol. 7, p. 3 , 1976.

**LORENTZ, H. A. (1887)**, "De l'influence du mouvement de la Terre sur les phénomènes lumineux", *Archives Néerlandaises*, T. XXI (1887), p.101.

**MASCART (1872)** - "Sur les Modifications qui éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur". *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 2ème série, 1, 157-214, 1872.

-----**(1873)** - "Mémoire manuscrit déposé à l'Académie des Sciences pour le Grand Prix des Sciences Mathématiques de 1872 sur l'épigraphe Nihil", aux Archives de l'Académie des Sciences, 1873.

-----**(1889)** - *Traité d' Optique*, trois volumes, Paris, 1889 , (le troisième volume fut publié en 1893).

**MAYARGUE, A.(1991)** - *L'aberration des étoiles et l'éther de Fresnel(1729-1851)*, thèse de doctorat, université de Paris 7, Paris, 1991.

**TONNELAT, M. A(1971)**. - "L'Histoire du Principe de Relativité" - Flammarion, Paris, 1971.

**WILSON (1972)** - "George Gabriel Stokes on Stellar Aberration and the Lumineferous Ether"; *British Journal of History of Science*, 6, 57 - 72, 1972.

**WHITTAKER, E.(1951)** -"A History of the Theories of Aether and Electricity"; deux volumes, 1989, Dover Publications, New York.

**YOUNG, T.(1804)** - "Experiments and calcination relative to physical optics", *Phil. Trans.*, XCIV (1804), 12-13.

