

A EXTENSÃO DO PRINCÍPIO DE RELATIVIDADE à ÓPTICA.

Maurício Pietrocola de Oliveira*

Introdução

Nesse trabalho pretendemos discutir como o Princípio de Relatividade, ao senso de Newton, é estendido da mecânica para a óptica ondulatória no século XIX. Para isso, iniciaremos nosso trabalho por uma rápida alusão à Relatividade na mecânica newtoniana e à noção de espaço absoluto, sem no entanto aprofundar esse tema. Em seguida passaremos a tratar os primeiros fenômenos ópticos que envolviam o movimento dos corpos, e como essas interpretações eram feitas na visão ondulatória da luz. Na parte final, concentraremos nossa atenção nas teorias luminosas do éter e nas experiências realizadas no século XIX objetivando fornecer uma interpretação coerente para a propagação da luz em corpos móveis, culminando pela proposição da Relatividade¹ "física"² para os fenômenos ópticos num trabalho de 1873.

A Relatividade na Mecânica Newtoniana e o Espaço Absoluto.

Não é necessário insistir sobre o papel da relatividade dos fenômenos físicos na obra de Galileu, e como essa concepção é desenvolvida e aperfeiçoada nos trabalhos posteriores de Descartes, Huygens, e outros. É, porém, nos trabalhos de Newton que ela ganha clareza e precisão na articulação ao princípio da inércia e à noção de "observadores livres". Evitando o círculo epistemológico que a definição de princípio de inércia e "observadores livres" poderia causar, Newton vale-se do conceito de espaço absoluto para explicitar essas duas noções. Segundo Tonnelat: "[Newton] vai fundar a noção de *observador «livre»* sobre a ausência de coerções (contraintes) «verdadeiras»; a presença de *forças reais* se relacionando, por direito, a *existência de movimentos absolutos*, a presença mesmo de um espaço absoluto, *espaço no qual o princípio de inércia e a lei fundamental da dinâmica seriam rigorosamente válidos*".³ Dessa forma, observadores em movimento retilíneo e uniforme em relação ao espaço absoluto seriam equivalentes, garantindo para si também a validade desse princípio e dessa lei. Aí temos a proposição da Relatividade dos fenômenos naturais, discriminando uma classe de observadores para os quais as leis da mecânica seriam representadas da mesma maneira.

Analisando diretamente as leis que governavam o movimento dos corpos (mecânica celeste), fica fácil perceber que a tais leis submetiam-se a Relatividade embutida na teoria de Newton. Na verdade, essas leis não dependem nem das velocidades, nem das posições absolutas dos corpos, mas simplesmente das variações dessas grandezas, que não mudam de um observador livre para outro. Assim, dentro da estruturação conceitual da mecânica newtoniana o espaço absoluto tinha um papel importante, na medida que ele permitia diferenciar sistemas sujeitos a efeitos de forças fictícias (não reais), como por exemplo sistemas sujeitos a movimentos de rotação (como no conhecido exemplo do

* - Departamento de Física - UFSC/ CNPq.

¹- Usaremos o termo Relatividade dentro do contexto da física em letra maiúscula para diferenciá-lo do seu uso comum.

²-Empregamos a terminologia utilizada por A. Tonnelat (1971) em sua obra, diferenciando-a da Relatividade descritiva ou cinemática. A relatividade física exprime o fato de leis físicas que descrevem fenômenos em sistemas em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme terem a mesma forma.

³op. cit. p. 69. Grifos no original. Traduzido por mim MPO

balde com água em rotação), de sistemas "livres" (ou inerciais, para usar um termo atual). Sendo estes últimos completamente equivalentes com relação aos efeitos "reais", tornava-se impossível-se qualquer tipo de diferenciação quanto ao seu estado particular de movimento (Princípio de Relatividade Restrita, ao senso de Newton), inclusive no que diz respeito aos movimentos relativos ao espaço absoluto. Resumidamente, o espaço absoluto teria existência real, pois haveria sistemas de referência onde o princípio de inércia não seria válido. Porém, o movimento dos corpos não poderia ser determinado em relação a tal espaço, pois ele seria equivalente a infinitos outros, que estariam em movimento relativo e uniforme ao mesmo.

A propagação Luminosa e o movimento dos corpos.

Bradley, Young e a aberração das estrelas.

Sem querer anteceder demasiadamente na história da óptica, passaremos a analisar os primeiros fenômenos onde a propagação da luz era associada ao movimento dos corpos. Nessa tarefa, devemos retornar dois séculos no passado, com o primeiro resultado ligando luz e movimento dos corpos. O primeiro fenômeno que de forma explícita associa luz e movimento, foi uma interpretação proposta por Bradley no século XVIII a partir de resultados de algumas observações sobre posição de estrelas. Propondo-se a medir o fenômeno de paralaxe⁴ astronômica das estrelas fixas, ele constatou uma pequena variação na posição da estrela Gama da constelação do Dragão quando as observações eram feitas entre 1725 e 1726, mais precisamente a variação observada era função da posição da Terra em sua órbita. As medidas obtidas não concordaram com as previsões esperadas para o efeito de paralaxe⁵, levando Bradley a explicar o fenômeno de outra forma. Ele propôs que a modificação observada era causada pela composição do movimento de translação da Terra com a propagação luminosa. Esse fenômeno recebeu o nome de *aberração* das estrelas fixas.

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, admitia-se implicitamente que o movimento dos mesmos seria rígido pelas leis dos corpos rígidos. Assim a constatação do efeito de aberração das estrelas evidenciou uma consequência possível, mas não conhecida da teoria corpuscular da luz: a propagação luminosa podia ser influenciada⁶ pelo movimento dos corpos ponderáveis⁷, variando de observador para observador, em função de seu movimento relativo.

Nossa discussão avança cento e cinquenta anos, onde a então antiga visão ondulatória da luz, formulada por Huygens, inicia seu renascimento com os trabalhos de Young na passagem para o século XIX. Procurando mostrar que esse modelo era capaz de interpretar corretamente os fenômenos luminosos, ele tenta explicar a aberração numa concepção ondulatória, enfrentando problemas. Nesta tarefa, Young toma consciência que interpretação da variação observada na posição das estrelas ditas

⁴-Pequena variação na posição das estrelas fixas causada pela mudança de posição da Terra na sua órbita.

⁵-As variações medidas na posição encontravam em plano perpendicular ao efeito esperado pela paralaxe.

⁶-Entenda-se aqui "influenciada" no sentido genérico da palavra, sem nenhuma conotação a influência do tipo gravitacional ou outra.

⁷-Nós definimos aqui os corpos como "ponderáveis" em oposição a outro tipo de matéria, o éter, considerado na época também como matéria impoderável.

fixas não poderia vir unicamente dos pressupostos teóricos contidos na visão ondulatória de Huygens, sendo necessário a inclusão de uma hipótese adicional: devia-se, para tanto, supor o éter totalmente imóvel no espaço e não influenciado pelo movimento da Terra. Essa hipótese foi feita em 1804.⁸ Para tanto ele, apresentou-a através de uma analogia:

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, tão livre talvez quanto o vento passe através de um bosque de árvores.⁹

Admitindo-se que o éter não é perturbado pelo movimento da Terra, era correto supor que a composição entre a velocidade de propagação da luz e a velocidade de translação terrestre, resultando no efeito observado na aberração. Sendo o éter completamente fixo no espaço, a propagação de um pulso luminoso equivale, para fins de composição de velocidades, a um corpúsculo móvel no espaço.

Com essa hipótese adicional, o movimento relativo da Terra ao éter explicaria a existência do efeito observado. Como na experiência do balde levantada por Newton, a existência dos efeitos de aberração na posição das estrelas evidenciariam que o movimento da Terra existia em relação a qualquer coisa, esta podendo ser o éter luminoso.¹⁰ Assim, inicia-se uma longa sucessão de experiências que procurando auxiliar na construção de um sistema teórico coerente para a interpretação da influência do movimento sobre a propagação da luz iria permitir a associação do éter a um referencial privilegiado.

Arago e as experiências sobre a refração.

Sem desviarmos muito do objetivo central desse trabalho, vejamos duas outras experiências realizadas em 1806 e 1810, que procuraram precisar a influência do movimento dos corpos sobre a propagação da luz.

Seguindo instruções de Laplace, Biot e Arago foram levados a resolver um problema trazido à teoria corpuscular pela observação sistemática do fenômeno de aberração: pois ainda que o princípio do fenômeno de aberração (composição de velocidades da partícula de luz e da Terra) fosse compatível com a visão newtoniana, a observação dos desvios de vários corpos celestes fornecia valores iguais para o ângulo de aberração, implicando que a velocidade de propagação dos corpúsculos luminosos no espaço seria constante. Essa consequência 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 os ângulos de aberração eram iguais para a luz emitida por diversos astros. Tal verificação é feita em 1806 pelos dois cientistas franceses, através da medida da refração da luz emitida por vários corpos celestes. Seus resultados foram apresentados à *Academia de Ciências de Paris*, confirmando a constância da velocidade da luz e mantendo a incompatibilidade com a teoria.

⁸- Young (1804).

⁹-Young (1804), p. 1. Traduzido por mim MPO.

¹⁰-Vale a pena objetar nessa parte do trabalho que, embora nos anos que seguiram os cientistas assumiram essa postura em relação às consequências do fenômeno de aberração, tal efeito podia apenas evidenciar que, como afirmaria Poincaré no início do século, a Terra variava sua posição em relação às estrelas fixas. Esse fenômeno por si só ainda não sendo uma evidência do movimento "absoluto" da Terra em relação ao éter.

Numa publicação posterior, Arago escreve que, desse resultado experimental, pode-se afirmar 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"¹¹.

A segunda série de experiências realizadas em 1810, desta vez executadas somente por Arago, tentou invalidar o princípio newtoniano da refração que afirma que uma desigualdade no desvio provocado por um mesmo meio sobre a direção da propagação luminosa, 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. Como sublinha, Mayrargue, a solução proposta por Arago para salvar a interpretação newtoniana da aberração luminosa, equivalia a negar um princípio mais básico na sua teoria.¹² Independentemente do resultado das experiência que Arago realizaria para testar essa hipótese, o modelo de Newton para luz já encontrava-se em cheque.

Para verificar experimentalmente essa hipótese, Arago vale-se do fato que o movimento da Terra podia ser composto com a velocidade da luz para produzir variações na velocidade de propagação luminosa dentro do prisma terrestre. O movimento de translação possuindo a maior velocidade que se podia obter na época, produziria efeitos 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.¹³

Medindo o ângulo de refração num prisma onde a luz de uma estrela, em direção a qual a Terra movia-se, penetrava perpendicularmente à sua superfície, e comparando com a mesma medida realizada no sentido oposto, Arago esperava observar alguma variação na trajetória luminosa. Em termos modernos, poderia-se dizer que essa montagem visava demonstrar a existência de assimetrias na lei de refração, em função da direção do movimento terrestre, previsão compatível com os modelos luminosos corpuscular e ondulatório. Essa previsão evidenciava que as leis ópticas da época, diferentemente das leis mecânicas aplicadas aos corpos macroscópicos, dependiam da velocidade (direção e módulo) de propagação, e não da variação dessa grandeza.

Ligando as motivações dessa experiência com a Relatividade das leis físicas da mecânica newtoniana, é possível inferir um *status* diferente para óptica. Embora estruturada dentro do mesmo corpo teórico (ação entre partículas de matéria através de forças centrais), os fenômenos luminosos pareciam contrariar um dos princípios fundamentais da mecânica newtoniana, a Relatividade. Pelas previsões de Arago, as experiências de óptica realizadas sobre a Terra deveriam fornecer informações sobre o movimento da mesma.

Entretanto, essa discussão sobre a possível constatação do Movimento Terrestre no espaço não chegou a ser levantada naquele momento, pois executando a experiência, Arago deparou-se com um resultado nulo, verificando que os desvios da luz nas duas situações eram exatamente iguais.¹⁴ Se a expectativa de Laplace com esses trabalhos era obter resposta ao problema da interpretação da aberração nos moldes newtoniano, a empreitada não trouxe nenhuma solução, obrigando Arago a

¹¹-Arago (1810), p.40. O artigo de 1810 só foi publicado posteriormente, em 1853, nos *Comptes Rendus de l'Académie des sciences de Paris*.

¹²-Mayrargue (1991).

¹³-Arago (1810).

¹⁴-Vale a pena adiantar que a precisão dessa experiência foi criticada por diversos cientistas que sucederam Arago, entre eles E. Mascart e Lorentz.

propor em seu artigo que a igualdade observada nos desvios era causada pela sensibilidade dos olhos em "ver" apenas raios de luz com uma certa velocidade. Nessa hipótese a coincidência nos desvios devia-se ao fato dos raios observados nas duas situações não serem os mesmos.

Os resultados encontrados por Arago e Biot podiam ser resumidas assim:

a) a experiência de 1806 mostra que o desvio da luz obtidos por refração é o mesmo para diferentes corpos celestes, independente das características dos mesmos, inferindo-se daí a constância da velocidade de propagação luminosa no espaço.

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

Fresnel e o éter arrastado

Voltemos a teoria ondulatória, reeditada nos moldes de Young, e vejamos como esses novos resultados eram incorporados. Os resultados da experiência de 1806 não representava nenhum problema para a concepção ondulatória da luz, pois era característica fundamental a independência da velocidade de propagação das ondas em relação a sua fonte emissora. Porém, o resultado obtido em 1810 trazia problemas graves a teoria. Embora a hipótese da Terra totalmente transparente ao éter prestava-se bem à explicação da aberração, ela não era capaz de interpretar a igualdade medida entre os ângulos de refração na experiência de 1810. Para interpretá-la corretamente, seria mais simples supor o éter como totalmente arrastado pelo movimento terrestre. Nesse caso, a ausência de variação nos ângulos de refração medidos por Arago seriam explicados, porém abrir-se-ia mão da explicação da aberração. Assim, aberração e simetria na refração medidas sobre a Terra necessitavam de hipóteses contrárias sobre o comportamento da matéria em relação ao éter.

Essa contradição existente dentro da concepção ondulatória da luz aparece de forma explícita nos textos de Fresnel. Numa carta a Arago, publicada em 1818, ele faz a seguinte afirmação:

*...se admiti-se que o nosso globo imprime seu 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 ...*¹⁵

A contradição desaparece da teoria ondulatória quando Fresnel, nessa mesma carta endereçada a Arago, passa a considerar um efeito do movimento terrestre sobre o éter. Embora desconhecendo a hipótese de Young, ele propôs uma versão próxima a esta que, guardando a imobilidade do éter no espaço, supunha que uma pequena parte do mesmo era arrastado pelos corpos transparentes em movimento com a Terra. Neste caso, os dois fenômenos podiam ser interpretados dentro da teoria ondulatória. A nova hipótese é exposta da seguinte maneira:

*...até agora eu só pude conceber claramente este fenômeno igualdade na refração sobre a Terra 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.*¹⁶

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

¹⁵-Fresnel (1818), p. 58. Traduzido por mim MPO.

¹⁶-*Ibid*, p. 58. Traduzido por mim MPO.

A pequena influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz no éter fixo fazia todo a força da hipótese proposta por Fresnel. Era esse efeito que permitia a explicação da invariância da leis da refração em corpos em movimento, obtida nas 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 mesmo. Seguindo as idéias proposta por Huygens, Fresnel admitia que o éter no espaço livre de qualquer corpo material teria uma densidade constante d . Os corpos refringentes teriam uma concentração d' maior de éter no seu interior, 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.

Nessa hipótese, a ausência de variação na refração da luz observada por Arago era explicada pela compensação de dois efeitos contrários: um causado pelo movimento do prisma e outro pelo movimento do observador. Na verdade a interpretação proposta por Fresnel para a ausência de efeitos no desvio da luz pelo prisma 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.

Esse resultado foi da maior importância para o progresso da teoria ondulatória. O fato desses dois fenômenos (aberração e invariância da refração) terem sido conciliados dentro de uma visão ondulatória da luz deu-lhe sustentação face a esmagadora aceitação de que dispunha a teoria corpuscular entre os cientistas da época promovida por Laplace e seus seguidores.

Movimento dos corpos e propagação da luz

Propondo uma explicação a essa experiência de Arago, Fresnel inaugurou na verdade todo um programa de pesquisas que visou estudar a influência do movimento dos corpos na propagação da luz. Em 1839, Babinet¹⁷ procurou evidenciar a influência do movimento da Terra através do éter luminoso realizando uma experiência sobre a interferência de feixes luminosos que atravessavam uma lâmina transparente. Invertendo a orientação da lâmina em relação ao movimento orbital terrestre, a montagem não evidenciou nenhum efeito, tendo sido explicada por Stokes através hipótese do arrastamento parcial do éter.

O mesmo Stokes, alguns anos mais tarde em 1848, partindo de resultados obtidos em pesquisas sobre o comportamento de fluidos nas imediações de corpos sólidos em movimento, propôs uma hipótese diferente sobre a relação entre éter e matéria móvel.¹⁸ Segundo ele, o éter contido nas vizinhas da Terra seria completamente fixo em relação a sua superfície, enquanto que o éter distante da mesma continuaria imóvel no espaço. Haveria, no entanto, uma região de transição entre esta porção de éter fixo e o éter interespacial.

Essa outra hipótese também era capaz de interpretar corretamente a experiência de Arago de 1810, e, admitindo-se condições de contorno especiais para essa fase de transição, também a aberração das estrelas fixas podia ser explicada.

Visando decidir entre as duas hipóteses, Fizeau¹⁹ em 1851 mediu diretamente o coeficiente de arrastamento do éter pela matéria ponderável através da influência do movimento de uma corrente de

¹⁷-Babinet (1839).

¹⁸-Wilson (1972).

¹⁹-Fizeau (1851).

água sobre a propagação da luz que interferiam e produziam franjas luminosas. O resultado encontrado por Fizeau pareceu indicar a existência de um movimento relativo entre o movimento da água e o éter luminoso, fornecendo uma grande evidência à hipótese de Fresnel.

Hoek²⁰, em 1868, procurou avaliar o grau de concordância do coeficiente de arrastamento proposto por Fresnel através de uma experiência onde a luz de uma fonte artificial era levada a interferir passando no interior de um corpo transparente. Invertendo-se a experiência em relação ao movimento terrestre observa-se as franjas de interferência e inferia-se o coeficiente de éter arrastado pelo corpo transparente. A experiência realizada diversas vezes não evidenciou nenhuma variação na interferência produzida nas duas orientações. Desse resultado Hoek conclui que o coeficiente proposto Fresnel era exato na aproximação de 1/55.

Os resultados obtidos nessas duas experiências garantiram de certa maneira a hegemonia da hipótese do éter parcialmente arrastado no meio científico da época. Stokes e seguidores continuaram trabalhando na hipótese de um éter totalmente arrastado, não chegando a obter muito sucesso até o início dos anos 1880, com os primeiros resultados experimentais de Michelson.

Leis ópticas em corpos em movimento

Garantida a aceitação da hipótese de Fresnel sobre o éter parcialmente arrastado, os cientistas da segunda metade do século XIX passaram a aprofundar as implicações da mesma no estudo dos diversos fenômenos luminosos. Valendo-se da fórmula para o cálculo da velocidade nos corpos em movimento deduzida por Fresnel dessa hipótese, alguns experimentos foram tentados com intuito de:

- confirmar a validade da mesma nos mais diferentes domínios da óptica;
- verificar se, apesar da existência dessa hipótese, algumas leis ópticas poderiam ser influenciadas pelo movimento dos corpos.²¹

O objetivo dessa nova fase de pesquisas diferia da primeira (1818 ~ 1850) pelo fato dos trabalhos interessarem-se menos pelas relações entre o éter e a matéria em movimento, e mais pelas influências do movimento dos corpos sobre fenômenos luminosos específicos, mais precisamente sobre os efeitos observados nas leis ópticas e sua interpretação dentro da concepção de um éter parcialmente arrastado. Certamente essa mudança de enfoque acontece aos poucos, pois no início da segunda metade do século XIX temos ainda alguns trabalhos visando precisar as relações entre éter e matéria em movimento, como os de Hoek²². Porém no final da década de 1860 não há quase trabalhos que se apresentam com esse objetivo.

Vejamos alguns trabalhos que se orientaram nessa nova perspectiva..

Fizeau 1859

²⁰-Hoek (1868).

²¹-E dessa forma evidenciar indiretamente o movimento relativo entre a Terra e o éter luminoso.

²²- Hoek na verdade realiza experiências visando precisar essa relação entre 1868 e 1872.

Esse trabalho foi talvez o elo de ligação entre as duas fases acima citadas. Nele, Fizeau tenta, em 1859, medir o arrastamento do éter pela matéria sólida.²³ Sabendo que a rotação no plano de polarização da luz dependia do índice de refração do meio no qual a luz se propagava, Fizeau propõe-se a estudar tal fenômeno orientando sua montagem experimental em posições diferentes em relação ao movimento de translação da Terra. Como o índice de refração depende da relação entre a velocidade da luz no interior e no exterior do corpo, ele esperava observar uma variação no plano de rotação da luz refratada. Realizando a experiência, o resultado observado pareceu positivo e em acordo com a previsão tirada do coeficiente de arrastamento do éter proposto por Fresnel. Esse resultado foi retificado posteriormente por experiências no início do século XX.²⁴

Esse trabalho demonstrava novamente que a hipótese de um éter parcialmente arrastado era capaz de interpretar corretamente os resultados experimentais. Porém dessa vez a hipótese previa a existência de um efeito positivo envolvendo o movimento da Terra, ao contrário do que havia ocorrido antes nas experiências de Arago e Hoek, nas quais a ausência de efeito observado era explicada pelo arrastamento parcial do éter, e na de Fizeau de 1851 cujo o efeito observado era causado pelo movimento da corrente de água.

Esse resultado seria da maior importância para as pesquisas da época, pois como inferiria Mascart²⁵ alguns anos mais tarde, ele parecia determinar o movimento da Terra em relação ao éter fixo no espaço.

Babinet 1862/Angström 1864

Para a época, o resultado da experiência de Fizeau de 1859, abria uma nova perspectiva nas pesquisas que buscavam medir efeitos do movimento através de fenômenos luminosos outros que a refração.²⁶ Os fenômenos ópticos pareciam passíveis de ser influenciados pelo movimento dos corpos. O resultado obtido por Arago para a refração era entendido como uma compensação fortuita, não generalizável aos demais fenômenos da luz.

Nessa linha, Babinet, que desde de 1828 procurava evidenciar os efeitos do movimento sobre a luz²⁷, propõe em 1864 uma experiência onde o fenômeno óptico focado era a difração. O objetivo de Babinet, claramente indicado na carta depositada na *Academia de Ciências de Paris*²⁸, era determinar o movimento "próprio" da Terra através da observação de efeitos desse movimento em fenômenos onde as compensações existentes na refração não se manifestassem. Babinet declarava ter:

²³-Fizeau (1859).

²⁴-Brace, D.P.(1905).

²⁵-Mascart (1872).

²⁶-Na verdade Fresnel na sua carta de 1818 onde interpretava a ausência de efeitos do movimento sobre a a refração num prisma, indicava também que a paralaxe medida com uma luneta cheia d'água não deveria mostrar nenhum efeito (experiência realizada por Airy em 1887??). Stokes, baseado na hipótese de Fresnel, também previa ausência de efeitos para a reflexão.

²⁷-Babinet (1862a).

²⁸-Babinet (1862a).

encontrado no desvio produzido pelas redes (de difração) um desvio constante que desde agora tornará sensível o deslocamento do micrômetro e o movimento da Terra no espaço qualquer que seja a natureza desse movimento.²⁹

Seu interesse com essa experiência não era precisar as relações entre o éter e a matéria em movimento, como fora as experiências de Fizeau em 1851, e seria a de Hoek em 1868, mas de através desse resultado:

...determinar, se for possível, a velocidade de translação da Terra em direção a um ponto situado por $34^{\circ}1/4$ de declinação boreal e por 260° de ascensão, na constelação de Hércules...³⁰

E esse resultado:

...permitiria obter a paralaxe das estrelas fixas.³¹

Para Babinet, medir as variações na difração da luz através de uma rede de difração em movimento com a Terra era apenas um meio de colocar em evidência o movimento da Terra em relação ao éter, que, para ele estaria imóvel em relação às estrelas fixas. Portanto, o interesse de Babinet pelos estudos do éter, assim como o de vários outros homens de ciência de sua época, visava a Astronomia. A influência do movimento sobre a propagação da luz seria um meio de determinar o movimento terrestre em relação às estrelas fixas, resultado da maior importância para os astrônomos.³²

Embora tenha elaborado um sistema experimental para medir o efeito do movimento terrestre sobre a difração, Babinet não chega a realizar tal experiência. Ela foi materializada por Angström em 1864³³ e seus resultados pareceram confirmar as previsões de Babinet, indicando um efeito do movimento terrestre sobre os raios difratados.³⁴

Com essa experiência, o movimento "próprio" da Terra (como era referido em alguns textos da época) parecia ter sido determinado. Nesse contexto as leis da óptica não respeitariam o princípio de Relatividade física, apresentando resultados diferentes em função da orientação que os sistema experimental assumisse em relação ao movimento terrestre.

Mascart e o prêmio da Academia de Paris.

Em 1870 a *Academia de Ciências de Paris* propõe como tema para o prêmio do ano o seguinte título:

²⁹- Babinet(1862a), p. 2. Soulligné par moi M.P.P.O..

³⁰- Babinet(1862c), p. 564.

³¹- *Idem*.

³²-Mayrargue (1991).

³³- Angström, *Pogg. Annalen*, T. CXXIII, p. 500 (1864).

³⁴-Refeita por Mascart em 1872, com precisão superior, o resultado foi negativo.

Pesquisar experimentalmente as modificações que experimenta a luz no seu modo de propagação e suas propriedades, em consequência do movimento da fonte luminosa e do movimento do observador.³⁵

Segundo Buchwald³⁶, com esse prêmio a *Academia* pretendia afinar a validade da hipótese do éter parcialmente arrastado de Fresnel aos fenômenos ópticos em geral. Essa afirmação reflete em parte o objetivo da *Academia*, visto a disposição da escola francesa de óptica em expandir o alcance de tal hipótese. No entanto, é possível também inferir que a *Academia* pretendia incentivar o estudo das formas de propagação da luz em situações móveis pelos seguintes motivos: i) contexto científico da época, em especial pelos trabalhos de Babinet (apresentados também na *Academia*) e pelos resultados obtidos por Angström; ii) texto que anuncia o prêmio, exprimindo claro incentivo a pesquisas gerais sobre movimento e propagação da luz. Como o próprio título demonstra, mais que uma simples "verificação" da capacidade interpretativa da hipótese de Fresnel, o prêmio solicitava um tipo de conhecimento mais generalizado acerca dos fenômenos luminosos. Segundo esse ponto de vista, deve-se considerar a afirmação de Buchwald como correta, mas limitativa. O *Memoire* submetido ao prêmio confirma de um lado a proposição de Buchwald sobre a busca da ampliação da hipótese do éter parcialmente arrastado, mas por outro lado demonstra a vocação generalista sugerida pelo tema, onde a quase totalidade dos fenômenos ópticos conhecidos na época passíveis de evidenciar efeitos do movimento foram analisados.

Seguindo as diretrizes traçadas no prêmio oferecido pela *Academia*, E. Mascart realizou uma série de experiências buscando justamente estudar a influência do movimento dos corpos nos principais fenômenos ópticos.

No seu trabalho, ele opta por abordar a questão inicialmente levantando os principais resultados experimentais conhecidos na época e os pressupostos teóricos sobre os quais eram embasadas as interpretações. Aparentemente os resultados existentes eram para ele coerentes com a estruturação teórica da óptica ondulatória apoiada na concepção de um éter fixo e pouco modificado pelo movimento terrestre. Os resultados de diversas experiências, como as de Bradley, de Arago, de Hoek, de Fizeau, de Babinet/Angström aparentemente harmonizavam-se com a hipótese de um éter parcialmente arrastado pelos corpos materiais.

Tendo esse quadro inicial em mente, Mascart iniciou suas pesquisas com a expectativa de apenas aumentar as precisões dos resultados experimentais existentes. Para isso, ele resolveu começar seu trabalho propondo uma nova montagem para estudar o fenômeno de difração, seguindo o objetivo traçado por Babinet em seu trabalho de 1862. O resultado encontrado foi negativo, mostrando que a difração não era influenciada pelo movimento da Terra. A observação obtida nessa experiência divergia totalmente daquela obtida por Angström, levando Mascart a repetir e variar seus métodos de observação. Atingida uma precisão considerada por ele incontestável, a solução foi re-interpretar a experiência e localizar o problema na previsão de Babinet, que até então parecia em total acordo com a teoria.

Sem querer analisar em muitos detalhes o problema contido na interpretação de Babinet, apenas frisaremos que nos seus cálculos ele não considerava a influência do movimento da fonte luminosa na direção final do raio de luz, efeito esse que adicionado ao problema compensava o efeito inicialmente previsto.

Em seguida Mascart passou a estudar o fenômeno de refração, buscando uma montagem que fosse capaz de evidenciar a influência do movimento do prisma, atingindo o objetivo perseguido por

³⁵-CRAS, vol75, 1872, p. 1297.

³⁶- Buchwald (1988), p.57

Arago na sua experiência de 1810. Numa primeira montagem, usando fontes artificiais de luz, Mascart pensou haver chegado a um resultado positivo, supondo ter observado uma assimetria na direção de raios luminosos refratados por prismas com movimentos opostos em relação ao movimento terrestre. Esse resultado implicava que a compensação proposta por Fresnel para a refração da luz emitida de fontes "fixas" em relação ao éter, não ocorria com o uso de fontes móveis (luz artificial ligada à Terra). Porém, numa série de experiências mais precisas, com novos equipamentos o resultado foi constantemente **negativo**.

O resultado dessa experiência foi muito importante para o estudo da questão, pois deixou definitivamente comprovado que a experiência de Arago fora negativa pelo emprego de prisma achromático. Na verdade a explicação dada por Fresnel para essa experiência aplicava-se na verdade àquelas com emprego de fontes solidárias ao prisma e ao observador, como ocorria na sua montagem (todo sistema fixo em relação à Terra). As compensações entre efeitos produzidos pelas várias partes do sistema óptico (fonte, prisma e observador) só ocorria quando todas moviam-se com a mesma velocidade.

Suas pesquisas prosseguiram com o estudo de outros fenômenos ópticos como a dupla refração retilínea, a dupla refração circular, a produção dos anéis de reflexão e de lâminas mixtas, capazes de evidenciar efeitos do movimento sobre a luz. Todas essas experiências mostraram que a inversão completa de um sistema óptico ligado à Terra não era capaz, dentro da precisão da época, de colocar em evidência a influência do movimento terrestre em relação ao éter. A conclusão redigida por Mascart no final do seu trabalho ressaltava esse resultado, afirmando claramente a impotência dos fenômenos ópticos em evidenciar movimentos absolutos.

A conclusão geral desse Mémoire seria então (fazendo-se abstração da experiência de M. Fizeau sobre a rotação do plano de polarização por séries de pilhas de vidro) que o movimento de translação da Terra não tem nenhuma influência apreciável sobre os fenômenos da óptica produzidos com uma fonte terrestre ou com a luz solar, que esses movimentos não nos dão o meio de apreciar o movimento absoluto de um corpo e que os movimentos relativos são os únicos que nós podemos atingir.³⁷

Os termos empregados nesse parágrafo mostram uma nítida preocupação com os aspectos gerais da influência do movimento sobre a luz. Mesmo que essa característica não apareça explicitamente no início de seu trabalho, Mascart parece consciente que suas pesquisas poderiam colocar em evidência o movimento absoluto da Terra através da observação de assimetrias nas leis ópticas. No entanto, as experiências foram categóricas em demonstrar o contrário, conclusão que ele apresenta nesse parágrafo final.

Essa proposição é a extensão do **Princípio de Relatividade Física**, da mecânica, para a óptica, expresso em termos experimentais e limitado a uma ordem de precisão específica (primeira ordem em v/c) As experiências que haviam evidenciado efeitos do movimento sobre a propagação da luz, como a observação de Bradley e a de Fizeau de 1851, haviam na verdade colocado em evidência a influência do movimento relativo entre dois corpos materiais.³⁸ Desde que as experiências fossem realizadas em sistemas solidários, as leis ópticas seriam indiferentes a esse movimento, fruto de compensações que mascaravam o efeito individual de cada parte.

Conclusão

³⁷-Mascart(1874), p. 420. Itálicos no original.

³⁸-Entre a estrela e a Terra no primeiro caso, e entre a água e a fonte no segundo

No rastro da experiência realizada por Arago em 1810, vários trabalhos sugeriram que as leis ópticas poderiam colocar em evidência a influência do movimento sobre a propagação da luz, e como consequência destacar a posição privilegiado do éter como referencial para os fenômenos ópticos. As várias experiências realizadas ao longo da primeira metade do século XIX forneceram resultados contraditórios sobre este último ponto, ora parecendo indicar que os possíveis efeitos anulavam-se (fenômeno de refração e reflexão), ora evidenciando alguma fator (difração e rotação do plano de polarização).

Estudando a questão motivado pelo prêmio proposto pela *Academia de Paris*, Mascart leva tais pesquisas às últimas consequências, procurando de um lado verificar a adequação da hipótese de Fresnel a outros fenômenos da óptica, e de outro analisar de maneira geral a influência do movimento sobre a propagação da luz. Diferenciando sistemas com fontes terrestres de sistemas com fontes estelares, ele foi capaz de enunciar a impotência das experiências de óptica de sua época em evidenciar efeitos do movimento absoluto dos corpos por meios ópticos. Seu trabalho é o marco de uma linha de pesquisa dentro da óptica do século XIX, onde a preocupação passa a ser o estudo da óptica dos corpos em movimento, que contou nos anos a seguir com nomes importantes como os de Michelson, Poincaré, Lorentz, e o do próprio Einstein no início desse século.

A extensão do Princípio de Relatividade à óptica foi uma das grandes contribuições desse trabalho.³⁹ O valor do mesmo pode ser medido em duas citações de Paul Langevin.

*Aparecia aí lna conclusão final do trabalho de Mascartl, pela primeira vez, de forma definitiva para os fenômenos ópticos, o que nomeia-se hoje o princípio de relatividade, o qual experiências posteriores estabeleceram, em todos domínios, a perfeita exatidão ... é essencial lembrar que Mascart, depois de um esforço experimental considerável, pode, pela primeira vez, afirmar a exatidão.*⁴⁰

Na segunda referência Lanvegin é analítico, na medida em que ele precisa o contexto dentro do qual Mascart estende o Princípio de Relatividade para a óptica:

*Eu insisto aqui sobre a teoria da Relatividade não somente por que ela teve nos últimos vinte anos e continua a ter um papel fundamental na história da física, mas também para sublinhar o fato que os trabalhos de Mascart contribuíram de maneira importante a estabelecer as bases experimentais sobre as quais se apoia o enunciado do princípio mesmo da relatividade... Antes de ser estabelecido por Michelson com uma precisão de segunda ordem,... estes dados essenciais tinham sido estabelecidos por Mascart na primeira ordem... para todo o conjunto de leis da óptica: reflexão, refração, difração, fenômenos de interferência em geral. É preciso reconhecer em Mascart um dos fundadores da teoria da relatividade.*⁴¹

Se a comparação com Michelson é merecida, vale notar, como afirma Langevin, que os trabalhos de Mascart visaram uma generalidade não perseguida pelo primeiro. Na verdade o objetivo de Mascart não era somente obter os efeitos do movimento sobre a luz, mas estudar o comportamento da luz em corpos em movimento.

Bibliografia⁴²

³⁹-Essas pesquisas de Mascart são citadas em artigos importantes da época, como o de Lorentz (1887) e no livro de Poincaré (1901)

⁴⁰-Langevin (1909), p. 12. Itálicos no original.

⁴¹-Langevin (1931), p.75. Sublinhado por mim MPPO.

⁴²-Nós utilizaremos a abreviação CRAS para *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*.

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

BABINET, J. (1839) - "Sur l'aberration de la lumière", *CRAS*, vol. 9, p. 774.

-----**(1862a)** - "Expérience pour rendre sensible le mouvement ou plutôt les mouvements divers de la Terre." pli cacheté n°2073, déposé à l'*Académie des Sciences de Paris*, le 01/09/1862. Manuscrit aux Archives de l'*Académie des Sciences*.

-----**(1862b)** - "Addition au paquet déposé le 1^o septembre 1862." paquet n° 2075, déposé à l'*Académie des Sciences de Paris*, le 08/09/1862. Manuscrit aux Archives de l'*Académie des Sciences*

-----**(1862c)** - "De l'influence du mouvement de la Terre dans les phénomènes optiques"; *CRAS*, vol. 55, p. 561.

BRACE, D. B.(1905) - "A Repetition of Fizeau's Experiment on the Change Produced by Earth's Motion on the Rotary of Refracted Ray", *Philos. Mag.*, 10, 591-599.

BRADLEY, J.(1729) - "James Bradley's letter to Halley", *Philosophical Transaction*, 406, vol. 35.

BUCHWALD, Z. (1981) - "The quantitative ether in the first half of the nineteenth century", dans *Conceptions of ether*, Cantor(1981).

-----**(1985)** - *FROM MAXWELL to MICROPHYSICS, Aspects of Electromagnetic Theory in the Last Quarter of the Nineteenth Century*, The university of Chicago Press, Chicago, 1985.

-----**(1988)** - "The Optics of Moving Bodies as a peripheral concern before the 1890s", *The Michelson Era in America Science 1870-1930*, Cleveland, Oh, 1988

FIZEAU, H.(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..

-----**(1859)** - "Sur une méthode propre à rechercher, si l'azimut de polarisation du rayon réfracté est influencé par le mouvement des corps réfringents. Essai de cette méthode",*CRAS*, Vol XLIX, p. 717.

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^o s. , 818; *Oeuvres complètes* , pag.627.

HIROSIGE, T. (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.

HOEK, M. (1868) - "Détermination de la vitesse avec laquelle est entraînée une onde lumineuse transversant un milieu en mouvement"; *Archives Néerlandais*, III., p. 180, 1868.

LANGEVIN, P.(1909) - "E. Mascart", *Annuaire du Collège de France*, neuvième année, Paris, Ernest Leroux éditeur, 1909.

-----**(1931)** - *La physique au Collège de France*, "extrait du livre composé à l'occasion du quatrième centenaire du Collège de France, PUF, 1931.

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

-----**(1870a)** - "Pli cacheté n° 2533, déposé le 31/01/1870 à l'Académie des Sciences de Paris, sur le titre "Sur les variations des longueurs d'onde de la lumière".

-----**(1870b)** - "Mémoire manuscrit déposé à l'Académie des Sciences pour le Grand Prix des Sciences Mathématiques de 1870 sur l'épigramme Labor", aux Archives de l'*Académie des Sciences*, 1870.

-----**(1872a)** - "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.

-----**(1872b)** - *Notice sur les travaux scientifiques de Mascart*, Gauthier-Villards, Paris, 1872.

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

-----**(1874)**- "Modifications qu'éprouve la lumière par suite du mouvement de la source lumineuse et du mouvement de l'observateur (deuxième partie)", *Annales Scientifiques de l'Ecole Normale Supérieure*, 2ème série, 3, 363-420, 1874.

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

MILLER, A. (1981) - *Albert Einstein's Special Theory of relativity*; Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1981.

PATY, M. (1992) - *Einstein Philosophe*, PUF, Paris, 1993 .

PIETROCOLA DE OLIVEIRA, M. (1992) Mascart et l'Optique des corps en mouvement. Tese de doutorado, Universidade de Paris 7, Paris, 1992. (Não publicada).

POINCARÉ, H.(1901) - *Electricité et Optique*, ed. Jacques Gabay Réimpression de la deuxième édition, 1990- Paris.

-----**(1902)** - *La science et l'hypothèse*, Flammarion, édit. en livre de poche, 1968

STOKES, G.(1845a) _ "On Fresnel's theory of aberration of light", *Philosophical Magazine*, 3rd ser., XXVII(1845).

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

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

WILSON, D. (1972) - "George Gabriel Stokes on Stellar Aberration and Luminiferous Ether", *The British Journal for the History of Science*, vol VI, part. I, n° 21.

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