

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO DE SANTA CATARINA – IFSC
CÂMPUS ARARANGUÁ
LICENCIATURA EM CIÊNCIAS DA NATUREZA – HABILITAÇÃO EM FÍSICA

JANAINA NUNES DE SOUZA

UMA LUZ SOBRE O SÉCULO XIX: A ÓPTICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO

Araranguá

2013

JANAINA NUNES DE SOUZA

UMA LUZ SOBRE O SÉCULO XIX: A ÓPTICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Ciências da Natureza – Habilitação em Física do Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Araranguá, como parte das exigências para a obtenção do título de licenciado em Ciências da Natureza/física.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Gregório Gomes

Araranguá

2013

“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso”. (ALBERT EINSTEIN).

Dedico aos meus pais, exemplos de que se pode perder algumas vezes, mas jamais deixar de lutar. Seu exemplo valeu mais do que mil palavras.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, que além de pais maravilhosos foram amigos, conselheiros e educadores durante toda a minha jornada. Sem vocês eu teria desistido no primeiro obstáculo.

Agradeço aos meus irmãos, por estarem ao meu lado incentivando meu progresso e estimulando minha curiosidade com seus próprios exemplos.

Agradeço aos meus professores que em diferentes áreas dividiram comigo seus conhecimentos e experiências, obrigada por enriquecerem minha vida e minha jornada com seus conhecimentos preciosos.

Agradeço especialmente ao meu orientador, professor Gersón Gregorio Gomes cuja atuação me proporcionou a realização do presente trabalho e me levou a compreender que quando estabeleço uma meta e luto por ela, consigo alcançá-la.

Aos demais funcionários da instituição, colegas e amigos, serei eternamente grata pelo auxílio, pela presença e pelos sorrisos compartilhados.

A Deus agradeço pela vida, pela família, amigos, colegas, pelas oportunidades e pela força para lutar a cada dia.

RESUMO

Neste trabalho analisamos os trabalhos de ótica do século XIX, em particular os experimentos de medida da velocidade da luz no vácuo e em meios materiais. Apontamos também as contribuições ao desenvolvimento das duas últimas grandes revoluções da física ocorridas no século XX, a teoria da relatividade e a teoria quântica. As implicações para o ensino de física são brevemente discutidas.

ABSTRACT

In this paper we analyze the works about optics of the nineteenth century, in particular the experiments for measuring the speed of light in vacuum and in material resources. We showed also the contributions to the development of the last two major revolutions in physics that occurred in the 20th century, the theory of relativity and the quantum theory. The implications for the teaching of physics are briefly discussed.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 | ÓPTICA DO SÉCULO XIX | 14 |
| 2.1 | ASCENSÃO DA TEORIA ONDULATORIA | 14 |
| 2.2 | UM MEIO DE PROPAGAÇÃO DA LUZ | 19 |
| 2.3 | DESDOBRAMENTOS DO SÉCULO XX | 26 |
| 2.3.1 | Teoria da Relatividade Restrita | 27 |
| 2.3.2 | Teoria Quântica | 28 |
| 2.4 | INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS | 30 |
| 2.4.1 | O éter como referencial | 30 |
| 2.5 | EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY – CONCEITOS PARA COMPREENSÃO DO RESULTADO. | 32 |
| 3 | IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO E CONCLUSÕES | 33 |
| | REFERÊNCIAS | 37 |

1 INTRODUÇÃO

A história da física para os licenciandos é fator importante para sua formação, e este tópico não está contemplado nas unidades curriculares do nosso curso. Desta forma este trabalho tenta suprir essa lacuna, proporcionando ao licenciando uma aproximação com a pesquisa em história da ciência, percebendo que a construção do conhecimento científico não é algo linear mais construído ao longo da história.

Neste sentido o objetivo deste presente trabalho é resgatar os experimentos realizados no século XIX relacionados à concepção e propagação da luz apresentando os obstáculos enfrentados pela física da época e indicar como os resultados alcançados serviram como base para o desenvolvimento das novas teorias físicas no século XX.

Para a realização deste trabalho utilizamos da pesquisa bibliográfica tendo como principais referências nacionais os trabalhos de Pietrocola, a respeito do éter eletromagnético, o de Bassalo, que faz uma breve revisão geral do tema, e o recente artigo de Martins, além dos livros de Rival sobre experimentos de física e o de Resnick sobre teoria da relatividade.

Em língua estrangeira, destacam-se, principalmente, o livro do autor francês Darrigol que aborda aspectos históricos do desenvolvimento do eletromagnetismo e o clássico de Whittaker sobre teorias do éter e da eletricidade.

Neste primeiro momento vamos de forma breve situar alguns aspectos importantes que antecederam e serviram de base para os estudos da óptica do século XIX.

Desde os gregos a luz sempre foi motivo de estudos em busca da compreensão deste fenômeno. Partindo das relações da luz para com fenômenos similares, ou seja, fenômenos que também iluminavam ambientes escuros como o fogo, os antigos Egípcios procuravam explicações nas suas crenças, nos Deuses, sendo para eles a luz filha do Deus Sol.

Foi com os antigos Gregos que esta concepção começa a ter uma base mais científica, explorando a luz como um meio entre a natureza e o homem. Partindo deste princípio nasce uma questão básica: “a luz vem dos objetos que vemos ou sai de nossos olhos para os mesmos? Para Homero, poeta grego que viveu no século IX ou VIII a.C, a luz provinha dos olhos. Porém para o filósofo Pitágoras são os olhos que recebem os raios luminosos emitidos por objetos luminosos.” (BASSALO I, 1986, p. 138).

Várias hipóteses foram propostas sobre a origem da luz e a natureza da visão, mas foi com os estudos do matemático Iraquiano Abu- Ali Al-Hasan Ibn Al – Haytham (c.965-1038) que apresenta-se uma explicação mais científica e aceitável propondo que a

fonte dos raios luminosos está no objeto luminoso e que a reflexão desses raios ao chegar em nosso sistema ocular nos permite observar determinados objetos.

As discussões entre os filósofos da antiguidade sobre o caráter e a velocidade da luz se direcionavam mais na defesa do caráter ondulatório e se dividiam entre a hipótese da velocidade da luz ser finita ou infinita.

Para o grego Aristóteles (384-322) a velocidade da luz seria infinita e sua ideia de que a luz precisava de um determinado meio para se propagar vêm marcar as primeiras concepções da natureza ondulatória da luz.

Em 1632 Galileu Galilei (1564-1642) se mostra contrário há Aristóteles, defendendo o conceito de que a velocidade da luz é finita. Sua defesa a essa teoria foi descrita no livro “Discurso sobre os dois grandes sistemas do mundo”.

Além disto, Galileu tenta em 1638 determinar a velocidade da luz, fator importante na busca pela consolidação da teoria ondulatória, porém sem grande sucesso.

O experimento consistia na utilização de duas lamparinas. Seu assistente ficava numa colina e ele em outra numa distância considerável. Galileu acendia sua lamparina e quando o assistente percebia a luz ligava a dele, em sequência Galileu apagava a sua. Galileu então media o tempo de “ida e volta” da luz das lanternas, porém na época não dispunha de aparelho para medir esse tempo, para isso usava as batidas do coração.



Figura 1 – Ilustração experimento de Galileu Galilei. Fonte:

Mesmo não obtendo sucesso para medir a velocidade da luz, através dos estudos astronômicos de Galileu e sua descoberta dos quatro satélites de Júpiter, estes estudos serviram posteriormente para calcular da velocidade da luz com base em análises astronômicas.

Voltando-nos ainda para Aristóteles, cabe ressaltar outro estudo realizado pelo mesmo, que lança questionamentos que serviram de base para o estudo de outros fenômenos como a formação do arco íris. Para tal ele observou que:

A reflexão da luz do sol pelas nuvens ocorria para um ângulo determinado, dando surgimento, portanto a reflexão da luz, o que

explica a forma circular do arco Iris e que sua localização dependia do ângulo entre a direção dos raios solares incidentes e a dos raios refletidos pelas nuvens até os olhos do observador. (BASSALO I, 1986, p. 140).

Outros estudos como o experimento de Teodorico de Freiberg (c.1250 -1310) veio complementar as explicações de Aristoteles sobre a formação do arco Iris, porém algumas questões ficaram sem resposta.

Em 1666 Issac Newton (1642-1727) através de experimento com prismas traz uma explicação cientificamente aceita sobre a dispersão da luz solar. Outras questões só foram explicadas graças aos experimentos do físico e médico Thomas Young (1773-1829) a partir de 1801 com seus experimentos sobre a interferência da luz e do também físico Étienne-Louis Malus (1775-1812) com a descoberta do fenômeno da polarização em 1808.

A busca pela compreensão do fenômeno da luz abriu um leque de questões que norteiam e servem de alicerce para o estudo da Física Óptica até hoje. A compreensão do mecanismo da visão, a origem, velocidade e as bases das relações da luz com os objetos iluminados são alguns aspectos.

Porém a natureza da luz, corpuscular ou ondulatória ainda era motivo de debates. A controvérsia a respeito do comportamento da luz, ondulatório ou corpuscular, ascendeu no século XVII com Newton e Huygens e perpetuou-se até o século XIX resolvendo-se em favor da concepção ondulatória, devido aos trabalhos de Young, Malus, Arago e Fresnel, entre outros.

Pode-se dizer que foi a partir dos estudos de Grimaldi, Hooke e Boyle com o registro dos primeiros fenômenos Ópticos como a difração e interferência que se inicia o desenvolvimento da Óptica Ondulatória.

Os estudos de Robert Hooke (1635-1703) no qual observou o aparecimento de luz na sombra de um objeto e de anéis coloridos através da incidência da luz branca sobre uma lâmina transparente e fina chamou a atenção do físico Sir Isaac Newton defensor da teoria corpuscular da luz, que mais tarde descobriu o fenômeno da dispersão da luz com o famoso experimento da decomposição da luz branca por um prisma o que resultava nas cores do arco Iris. O inverso também foi confirmado por Newton no então conhecido disco de Newton.

O holandês Christiaan Huygens (1629-1695) adepto a proposta ondulatória de Hooke que afirmava que a velocidade da luz aumentava em meios mais densos, partiu deste princípio para aprimorar os conceitos de difração, reflexão e refração da luz e levando a formulação das leis de reflexão e da refração onde a velocidade da luz na água é menor do que no ar contrariando a versão Newtoniana que dizia que na água a velocidade da luz seria maior em virtude das partículas que a compõem.

Neste período a concepção corpuscular ainda permanecia forte entre os cientistas mesmo Newton tendo dito que a teoria corpuscular tem vários lados, com propriedades diferentes, apesar de considerar que essa transversalidade seria uma objeção insuperável a aceitação da teoria ondulatória de Huygens.

Contudo esta concepção de Newton sobre a transversalidade da propagação da luz só ganhou força a partir do século XIX com as experiências de Thomas Young sobre interferência e Étienne-Louis Malus com as experiências de polarização.

Ressaltamos novamente que as experiências realizadas para determinar a velocidade da luz contribuíram para consolidar a Óptica Ondulatória dentre as quais a de Olaf Romer.

Em 1675 utilizando a descoberta dos quatro satélites de Júpiter por Galileu, o dinamarquês Olaf Romer realizou a primeira medida astronômica da velocidade da luz.

Romer calculava o intervalo de tempo entre os eclipses no período de um ano, verificando que:

O período entre dois eclipses parecia mais longo quando Júpiter se afastava da Terra, isto porque a luz devia percorrer uma distância maior para nos informar o início do segundo eclipse. Comparando então os tempos de atraso e de avanço dos eclipses do primeiro satélite, segundo Júpiter e o Sol estivessem em oposição ou em conjunção, e deduziu que a luz era finita. (RIVAL, 1997, p. 31).

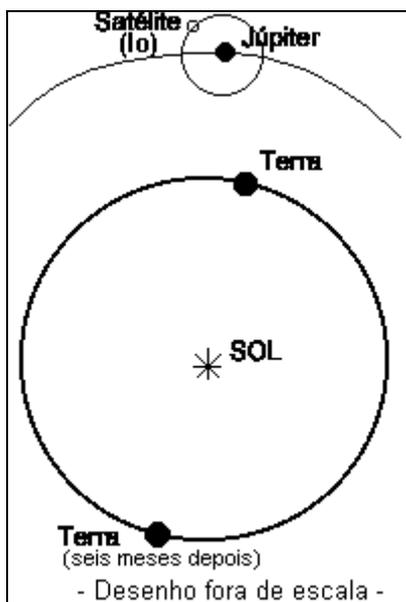


Figura 2 - Medida da velocidade da luz por Romer. Fonte: Seara da ciência.Universidade Federal do Ceará.

Quase 100 anos depois da primeira medida terrestre feita por Galileu, o valor medido para a velocidade da luz foi aceito através da experiência do Inglês James Bradley (1692-1762) em 1725 através da observação da paralaxe da estrela Gamma Draconis. Baseando-se nesta medida ele conseguiu determinar o valor de 304.000 Km/s para a velocidade da luz.

Neste sentido Bradley após meses de observação, expõe sua explicação, em 1725 para as variações da posição da estrela, dizendo que:

“Era um efeito devido ao movimento da Terra, mas que não correspondia à simples mudança de posição do observador: era um efeito devido a velocidade da Terra, que foi denominado de aberração da luz”. (MARTINS, 2012, p. 56)

Para tal é feito uma analogia com a chuva, que cai verticalmente e uma pessoa que segura um tubo aberto nas duas extremidades. Se este tubo estiver segurado de forma vertical, e a pessoa estiver parada, as gotas de água poderão atravessar o mesmo sem ter contato com suas paredes, porém se a pessoa estiver em movimento as gotas irão colidir com as paredes do tubo.

Para que as gotas passem pelo tubo, ele deve ser segurado de forma inclinada em relação a vertical. Observe a figura abaixo que ilustra esta analogia.

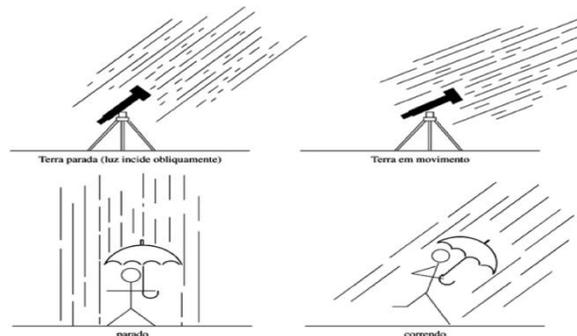


Figura 3 – Ilustração explicação aberração estelar. Fonte: Rev. Bras. Ensino de Fís.2005

A medida da velocidade da luz foi um dos aspectos fundamentais para a defesa da teoria ondulatória da luz, sendo aprimorada mais tarde, principalmente na propagação em meios materiais, devido aos experimentos de Fizeau, Foucault, Michelson e Morley. As ondas eletromagnéticas, estudadas teoricamente por Maxwell e experimentalmente por Hertz, vieram esclarecer a natureza da luz, além de revelar novos fenômenos a ela associados.

Neste sentido nosso foco será a descrição dos estudos realizados durante o século XIX sobre a luz, como as medidas da velocidade da luz no éter e em meios materiais, o surgimento da Teoria da Relatividade Especial e os experimentos de Hertz.

2 ÓPTICA DO SÉCULO XIX

2.1 ASCENSÃO DA TEORIA ONDULATÓRIA

O século XIX foi marcado por grandes revoluções que vieram alterar radicalmente a sociedade moderna. A Revolução Industrial iniciou-se no século anterior, na Inglaterra, e posteriormente espalhou-se pela Europa. Curiosamente, os estudos de óptica realizados durante o século XIX, tema deste trabalho, levou a outra grande revolução da era moderna. O avanço científico e tecnológico advindos da Teoria da Relatividade e Física Quântica mudaram a face do mundo moderno, conforme discutiremos mais adiante.

No contexto da óptica, os anos de 1800s foram marcados pelas experiências de Thomas Young (1801) sobre interferência e dupla refração e de Malus (1808) sobre polarização. Estes foram alguns dos diversos trabalhos que, juntamente com as medidas da velocidade da luz no éter e em outros meios materiais, contribuíram para o desenvolvimento da ótica ondulatória. Porém, conforme veremos no capítulo seguinte, os livros didáticos erroneamente apresentam os experimentos de Young como decisivos em favor da concepção ondulatória da luz.

Iniciaremos falando sobre os estudos de Young sobre interferência e refração. Thomas Young (1773-1829), médico e cientista inglês, instigado por experiências sobre interferência de ondas de água e pulsos de som, levantou a hipótese de que as interferências destrutivas e construtivas também poderiam ocorrer em ondas luminosas.

“Ao passar um feixe de luz através de dois orifícios construídos com papel grosso, Young obteve pela primeira vez uma figura de interferência luminosas, composta por faixas claras e escuras” (BASSALO, 1989, p. 38).

Esta experiência, realizada por Young em 1801, ilustrada na figura abaixo, proporcionou determinar o valor médio do comprimento de onda do espectro visível, obtendo, segundo Bassalo, 57×10^{-6} m, um valor cerca de dez vezes maior do que o atualmente aceito.

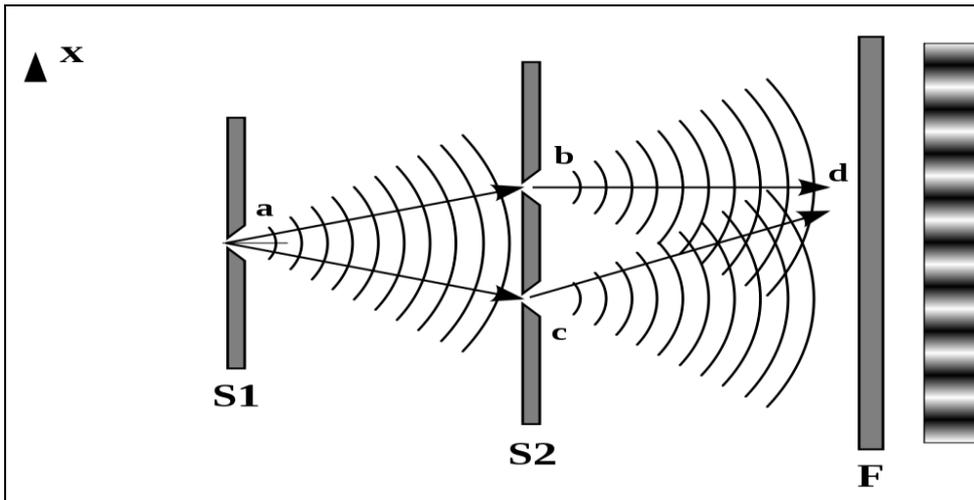


Figura 04: Dupla fenda de Young. Fonte: BASSALO, 1989

Trabalhos sobre a luz e visão também receberam considerável contribuição do médico e cientista. A formação de imagens do cristalino e deficiências como o astigmatismo pela irregularidade da curvatura da córnea foram algumas de suas pesquisas.

Mais tarde, em 1817, Young propõe a transversalidade da luz, outrora já mencionada por Newton para explicar a dupla refração, onde “a transversalidade da onda luminosa ocorre tal como com as ondas na superfície da água” (BASSALO III, 1989, p. 39), contribuindo ainda mais para a materialização da teoria ondulatória da luz e alicerçando os estudos posteriores de Arago e Fresnel. Relembramos que as ondas conhecidas até então eram as ondas mecânicas, que são longitudinais e necessitam de um meio para se propagarem.

Young aprimorou conceitualmente o que seria a dupla refração, porém, neste período, os estudos matemáticos eram considerados importantes para consolidar tais conceitos.

“A partir das décadas finais do século XVIII, Laplace passou a representar não só uma liderança política na comunidade científica francesa, mas também uma liderança intelectual. Seu projeto era unificar as duas heranças [a ‘physique générale’ e a ‘physique particulière’] numa só, fazendo com que a idéia de ação entre corpos, um sucesso no campo da Física Geral, pudesse também explicar os fenômenos da Física Particular, dando a esta última um caráter mais matemático. Esse programa [o Programa Laplaciano] exigiria a concepção de todos os fenômenos como sendo produzidos pela ação entre corpúsculos, da mesma forma que os planetas na teoria da gravitação universal. Mesmo combatido por outras visões de natureza, no campo da eletricidade o programa laplaciano deu resultados consistentes, como os obtidos pela lei de Coulomb. Os manuais didáticos franceses do início do século XIX

foram concebidos nesse contexto. Em pleno auge da revolução industrial e num país que tentava correr atrás do atraso em relação à Inglaterra, a formação científica mostrava-se como importante ferramenta dessa superação.” (BRAGA et al, 2008, p. 510).

Neste sentido a academia de ciências de Paris lançou um desafio aos cientistas da época visando à comprovação experimental e matemática de tal conceito.

Motivado por este desafio o físico Francês Étienne-Louis Malus, em 1808, realizou experiências sobre a dupla-refração tal que, utilizando um espato-da-islândia (calcita), na qual observava que a incidência da reflexão dos raios solares na mesma formava duas imagens, ou seja, ocorria uma dupla refração, porém com intensidades diferentes. Mas ao observar a luz solar diretamente com a calcita este fenômeno não ocorria, descobrindo a polarização por reflexão. (HALLIDAY 4, p. 25).

Como era adepto à teoria corpuscular newtoniana, Malus tenta explicar a reflexão por polarização como sendo a luz composta de moléculas, que quando em um meio mais refrigente, parte delas sofre repulsão e se agrupam formando um eixo paralelo entre si.

Por outro lado, Young, adepto da teoria ondulatória, procurou explicar a dupla refração através de uma hipótese audaciosa, qual seja, de que a luz era uma onda transversal, e procurou comunicar sua ideia a François Jean Arago (1786-1853), por meio de duas cartas enviadas a Arago, uma em janeiro de 1817 e outra em abril de 1818. (BASSALO III, 1989, p. 44).

Em 1815, instigado por Dominique François Jen Arago (1786-1853) e com base nos trabalhos de Thomas Young (1773-1829), Augustin-Jean Fresnel (1788-1827) em 1818, começou a realizar experimentos utilizando-se de dois espelhos e dois prismas para produzir as figuras de interferência e estudar o fenômeno da difração. Fresnel realizou vários experimentos sobre difração até chegar ao que hoje conhecemos como princípio de Huygens-Fresnel: segundo este princípio a projeção das ondas em um determinado anteparo é a soma de todas as ondas resultantes. (BASSALO III, 1989).

Retornemos, entretanto, ao ano de 1809, onde Arago, seguindo o ‘Programa Laplaciano’ anteriormente mencionado, procurou realizar um experimento quantitativo, qual seja, o de medir o ângulo da refração de um prisma, através do qual a luz de uma estrela cuja direção era seguida pela Terra, penetrava

perpendicularmente a sua superfície (ver figura abaixo). Comparava-se, então, o resultado com a medida de luz de outra estrela com posicionamento oposto.

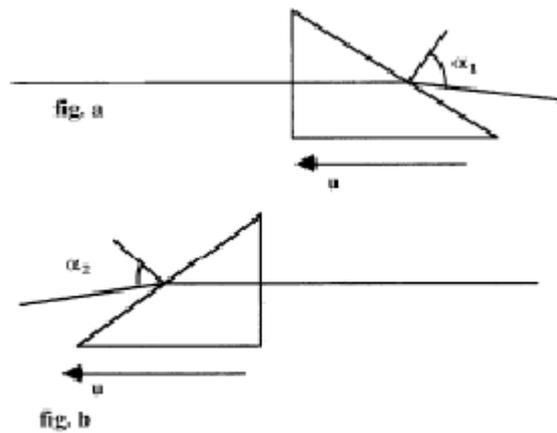


Figura 05: Esquematização do experimento de Arago. Pietrocola, 1993.

“Arago esperava observar alguma variação na trajetória luminosa. O experimento fundamentava-se no fato de que o desvio observado na passagem de luz pela superfície de separação de dois meios depende da relação entre as respectivas velocidades da propagação de luz nos mesmos”. (OLIVEIRA, p. 07).

Com este experimento, ele procurou observar o efeito do movimento da Terra sobre a luz. Para ele o desvio da luz pelo prisma era devido ao movimento da Terra em relação às estrelas, permitindo assim medir a velocidade da Terra em relação às estrelas, tentando reforçar a natureza corpuscular da luz.

Dez anos depois inúmeros trabalhos sobre difração da luz haviam sido realizados, fato que levou a academia francesa de ciências a escolher esse fenômeno como tema do seu famoso concurso. Fresnel expôs seus trabalhos e seu cálculo matemático para a mesma, porém como se baseou na teoria ondulatória não recebeu muita atenção.

Lembramos que, durante os séculos XVII e XVIII, a hegemonia da teoria corpuscular de Newton prevalecia entre a maioria dos cientistas, mesmo porque seus estudos explicavam muito bem os fenômenos até então conhecidos, deixando pouco espaço para as pesquisas sobre a teoria ondulatória iniciadas por Huygens. Dentre os membros da academia, adeptos da teoria corpuscular newtoniana, o físico Siméon Dennis-Poisson rebateu os trabalhos de Fresnel, mostrando por cálculos que tal teoria previa o aparecimento de um ponto brilhante bem no centro da sombra

projetada de um pequeno objeto. O prêmio daquele ano, aliás, foi instituído com o objetivo de mostrar a superioridade da teoria corpuscular sobre a ondulatória, decidindo em favor daquela teoria. Ironicamente, foi exatamente o oposto o que ocorreu.

Arago montou o experimento que obteve o hoje chamado 'ponto brilhante de Fresnel, e tornou-se um importante adepto da teoria ondulatória. Fresnel foi consagrado vencedor do prêmio, o que resultou em um novo olhar para a teoria ondulatória da luz.

Se a luz era um fenômeno ondulatório, segundo o que se conhecia à época das ondas mecânicas, deveria existir um meio no qual ela se propagasse. E se a luz viaja do Sol e das estrelas até nós, qual seria esse meio invisível que preenche o espaço? Diversos cientistas chamaram esse meio de *éter luminífero*. A designação "éter" remonta à teoria aristotélica dos quatro elementos (terra, água, fogo e ar) que compunham o mundo terrestre, e o quinto elemento (o éter) do qual tudo era feito no mundo celeste. Por razões óbvias, foi acrescentado a designação "luminífero".

Fresnel pode ser considerado como o principal cientista que lançou as bases para o desenvolvimento da teoria da relação entre os corpos transparentes e o éter luminífero, ou seja, a óptica dos corpos em movimento. Nosso ponto de partida é a explicação, dada por Fresnel, para o experimento de Arago de 1810, anteriormente discutido.

Essas várias discussões sobre a natureza da luz assim como debates sobre os fenômenos luminosos propunham explicações em bases conceituais bem diferentes. Descartes e Huygens defendiam a natureza imaterial da luz enquanto Newton o conceito contrário. Descartes descreve a luz como:

"Uma tendência ao movimento ou pressão que se transmitia com rapidez infinita e Huygens descrevia a luz como perturbações que se propagam num fluído universal nomeado éter, em analogia ao som Newton, acreditava na natureza corpuscular da luz, supondo a mesma composta por partículas luminosas que se propagam no espaço com grande velocidade". (apud OLIVEIRA, 1995, p. 01) .

Mas o que seria o éter?

2.2 UM MEIO DE PROPAGAÇÃO PARA A LUZ

Vários experimentos foram realizados durante o século XIX para tentar detectar o movimento da Terra em relação ao éter. Fresnel descrevia o éter como:

O éter preenche todos os espaços aparentemente vazios do universo, e que, nestas regiões, ele está em repouso. Ele geralmente não seria movido pelos corpos que se deslocam através dele, como a Terra. Nas regiões sem matéria, a luz se propagaria sob a forma de ondas neste éter parado. Devendo porém haver alguma interação entre o éter e os corpos transparentes. (MARTINS, 2012, p. 60).

Visando a velocidade da luz no éter que se propaga como onda, e esta sendo menor dentro dos corpos transparentes, o mesmo não poderá ter propriedades similares fora deles.

Desta forma Fresnel em analogia ao som, supôs que a densidade do éter é que variava. Sendo assim, 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 em uma região sem matéria”. (MARTINS, 2012, p. 61).

Para tanto, ocorreria o que se chamou de arrastamento do éter, onde parte da matéria seria atravessada pelo éter e o restante ficaria em seu interior tornando mais denso. Com este princípio, Fresnel conclui que não é possível medir o movimento da Terra em relação ao éter como queria Arago com seu experimento.

Porém a ideia da existência de um meio que deveria ser “ao mesmo tempo suficientemente rígido para propagar ondas transversais e suficientemente fluídico para permitir a passagem dos astros sem lhes causar nenhuma resistência”, (OLIVEIRA, 1995, p. 47), não era muito bem aceito pelos astrônomos.

“Nas três primeiras décadas do século, a teoria corpuscular da luz vai sendo atacada e acaba por ser substituída pela teoria ondulatória, principalmente graças aos trabalhos de Thomas Young (1773-1829) e Augustin Fresnel (1788-1827). Esses pesquisadores mostraram que certos fenômenos (interferência e difração) podiam ser explicados quantitativamente pela teoria ondulatória, enquanto sua explicação corpuscular era extremamente problemática. Conseguiram também explicar a polarização da luz assumindo que as ondas luminosas são transversais, e não longitudinais como o som. Em torno de 1830 a grande maioria dos físicos havia se convencido de que essa era a teoria correta.” (MARTINS, S/D, p. 04).

Em 1840 impulsionado pelos estudos sobre o éter e visando os problemas encontrados para determinar a velocidade da luz em diferentes meios, surgem novos conceitos, dentre os quais em destaque de George Gabriel Stokes (1819-1903).

Stokes propunha que o éter seria um material viscoso aderente a superfície dos corpos e quando próximo a Terra sofria um arrastamento. Sendo assim os experimentos feitos em Terra independem de seu movimento, pois o arrastamento faz com que eles sejam nulos, como ocorreu com os experimentos de Arago e Boscovich.

Com este princípio do arrastamento do éter pela Terra os fenômenos ópticos observados não comportariam o movimento que a Terra possui, e, portanto não seria possível explicar esses fenômenos, como a aberração estelar. Stokes recai dizendo que:

“Haveria uma gradual mudança de direção da luz à medida que ela atravessasse as sucessivas camadas de éter em diferentes velocidades, afirmando que sua teoria vem explicar todos os fenômenos conhecidos”. (OLIVEIRA, 1995, p. 63).

A teoria do éter luminífero persistiu por um longo período, recebendo contribuições de cientistas do século XIX, porém mostrava conflitos com as leis da mecânica.

Ainda neste período podemos destacar os trabalhos realizados para determinar a velocidade da luz em meios terrestres elaboradas por Hippolyte-Louis Fizeau (1819-1896) e Jean-Bernard-Leon Foucault (1819-1869).

Foucault conseguiu comprovar que a velocidade da luz no ar é maior do que na água contribuindo definitivamente para o êxito da teoria ondulatória da luz. Segue abaixo a descrição dos experimentos:

Fizeau determinou, em 1849 o primeiro valor da velocidade da luz utilizando o experimento conhecido como a roda dentada de Fizeau. Este experimento consiste em focalizar a luz de uma fonte pontual sobre os dentes de uma roda dentada, que compreendia 720 dentes, girando com uma velocidade uniforme em torno de um eixo paralelo à direção de propagação da luz. O feixe luminoso era então refletido sobre um espelho perpendicular ao seu eixo e voltava para atingir a roda dentada a uma distância de 8.633m. (RIVAL, p. 32).

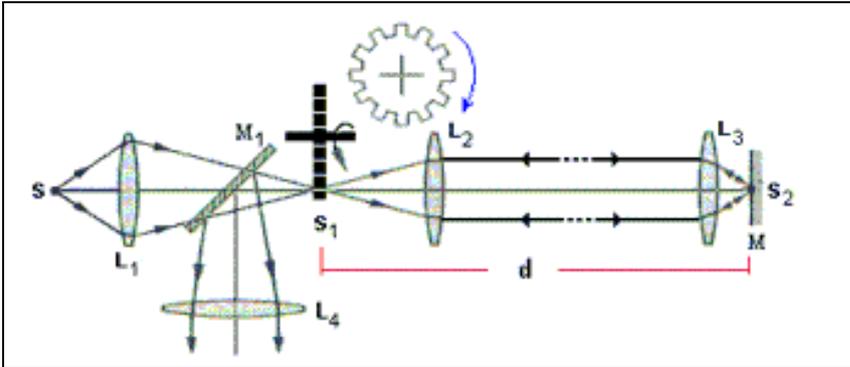


Figura 06: Roda dentada de Fizeau Fonte: educar.sc.USP, 2000.

O cálculo da velocidade da luz, conforme consta num exercício de um livro didático de ensino médio (Máximo e Alvarenga, 2010), consiste no seguinte. O tempo t que a luz gasta para ir, com velocidade constante, ao espelho e voltar à roda é

$$t = 18 \text{ km} / 3,0 \times 10^5 \text{ km/s} = 6,0 \times 10^{-5} \text{ s},$$

onde a distância o espelho foi arredondada para 9 km. Este tempo é aquele que deve ser gasto para que a roda gire de um ângulo correspondente à separação entre dois dentes consecutivos. Portanto, o período T de rotação da roda deve ser,

$$T = 720 \cdot 6,0 \times 10^{-5} = 4,32 \times 10^{-2} \text{ s}.$$

Assim, a frequência f da roda seria de,

$$f = 1 / 4,32 \times 10^{-2} = 23 \text{ Hz}.$$

Este é o número de voltas por segundo ou, em rotações por minuto,

$$f = 60 \cdot 23 = 1380 \text{ rpm}.$$

O valor obtido por Fizeau para a velocidade da luz foi de 315.000Km/s.

Um feixe sai da fonte de luz e incide sobre o espelho E1 que é semi-prateado: metade da luz passa adiante e se perde e metade se reflete para

a direita. O feixe refletido passa entre dois dentes de uma roda dentada e percorre uma grande distância entre a roda e um espelho normal E2. Refletindo em E2 ele volta pelo mesmo caminho, no sentido contrário. Passando novamente entre dois dentes da roda metade da luz passa por E1 e chega ao olho do observador (Fizeau). Nessa situação, põe-se a roda para girar com velocidade constante. Ajustando convenientemente a velocidade da roda é possível fazer com que o observador deixe de ver o feixe de luz. Isso se dará se, exatamente no tempo T que a luz leva para ir da roda até E2 e voltar, a roda gira e antepõe um dente no caminho do feixe que volta. Seja L a distância entre a roda e o espelho E2. A luz percorre 2L (ida e volta) em um tempo $T = 2L/c$, onde c é a velocidade da luz que Fizeau queria medir. Nesse mesmo tempo a roda gira e, no ponto onde o feixe deve passar, um espaço é substituído por um dente. Sendo N o número de dentes e se a roda dá M voltas por segundo, o tempo para trocar entre um espaço e um dente será $1/2MN$. Igualando esse tempo a T obtém-se $2L/c = 1/2MN$, logo, $c = 4LMN$. Portanto, basta medir o número de voltas por segundo (M), a distância L e o número de dentes N para se obter c. A roda usada por Fizeau tinha 720 dentes e a distância L era de 8.633 metros. Fizeau achou $M = 12,5$ voltas/segundo, obtendo $c = 315.00$ km/s. Nada mal para uma primeira tentativa, quase 200 anos atrás. (SEARA, 2013).

Fizeau com auxílio de Foucault também condicionou seus estudos para a teoria de Fresnel, o que os levou em 1851 a comprovação da mesma sobre o arrastamento do éter pelo movimento da Terra, com o seguinte experimento:

Uma corrente de água percorre um tubo de U, cujas extremidades são fechadas de vidro, de tal modo a permitir a passagem de luz por dentro da água. Um feixe inicial monocromático, é dividido antes de entrar no aparelho e cada uma das suas metades percorre o mesmo caminho dentro da água, porém em sentidos opostos. Como um dos feixes caminha no mesmo sentido que a água, ele deveria ter uma maior velocidade do que se estivesse parado, segundo a teoria de Fresnel, e o outro uma velocidade maior. (OLIVEIRA, 1993, p. 64).

A figura abaixo ilustra este experimento.

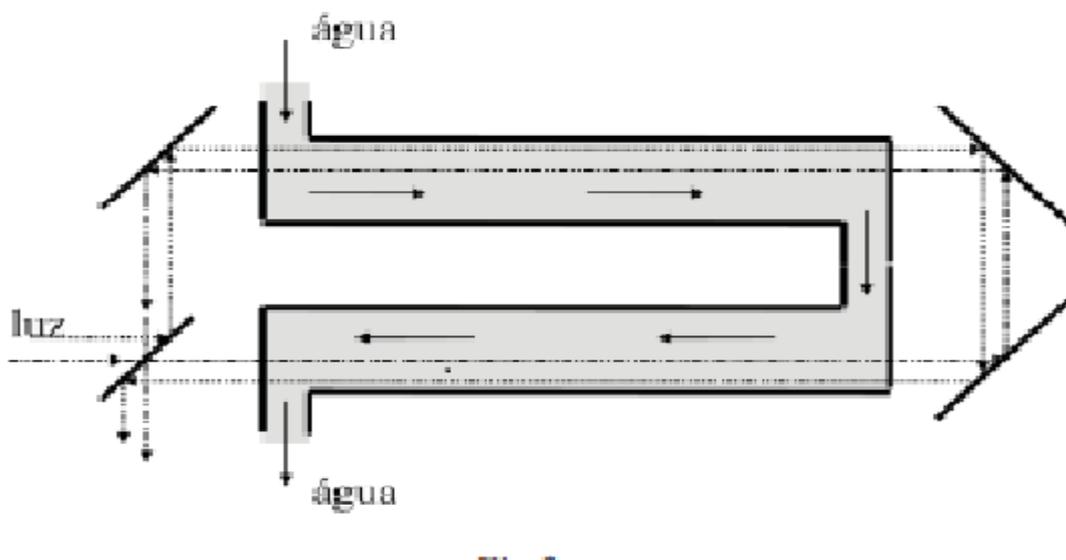


Figura 07: Corrente de água percorrendo um tubo em U. Fonte: Martins, 2012.

Dois foram os focos deste experimento, observar as figuras de interferência de dois feixes com a água parada e depois com a água em movimento observando o deslocamento das franjas de interferência. Obteve-se o deslocamento e este veio confirmar a teoria de Fresnel, pois o mesmo se fez pelo efeito do arrastamento parcial do éter pela água.

Membro diretor do observatório de Paris o apoio de Arago aos trabalhos de Fresnel foi um dos destaques da época. Posteriormente pesquisas sobre a influência da astronomia sobre a óptica ganharam olhar de destaque entre os estudiosos, porém a ideia da existência de um éter luminoso, meio que seria rígido para propagar ondas transversais e fluídico para não interferir no movimento dos astros não parecia aceitável entre os astrônomos.

Arago e seu prestígio entre as academias, foram propulsores na continuidade de pesquisas nessa área. Formando grupos de pesquisadores com o intuito de verificar experimentalmente as leis descritas nos estudos ópticos. Dentre os componentes destacam-se Fizeau e Foucault.

As pesquisas focaram na determinação da velocidade da luz no ar por meios terrestres e a comparação da velocidade da luz na água e no ar. O foco dos estudos sobre a dinâmica do éter ganha mais enfoque na Grã-Bretanha, onde se destaca os estudos de George Gabriel Stokes (1819-1903).

Stokes propôs uma teoria mais simples do éter, no qual ele seria “um material viscoso, que aderiria a superfície dos corpos, sendo quase totalmente arrastado pela Terra, ficando em repouso em relação a ela na região próxima ao solo. E este arrastamento seria o responsável pelos resultados nulos dos experimentos de Arago, porque os mesmos independem do movimento da Terra.” (MARTINS, 1995, p. 62).

Outros trabalhos surgiram posteriormente a fim de conhecer mais sobre o movimento da Terra através do éter. Destaca-se, porém os experimentos de James Clerk Maxwell (1831-1879) que partindo destes pressupostos utiliza-se de prismas para calcular o desvio da luz neste meio devido ao movimento da Terra, o que discutiremos posteriormente.

O movimento dos corpos produz considerável influência na propagação da luz. Estudos sobre o fenômeno da paralaxe levam Bradley a medir o efeito originário do movimento da Terra em sua órbita o então conhecido como aberração estelar, que será estudada mais adiante neste trabalho.

Alguns anos depois, em 1862, Foucault aperfeiçoou o método de Fizeau usando um aparato experimental em tudo semelhante, mas substituindo a roda dentada por um dispositivo octogonal rolante com um espelho de cada lado, a observação do desaparecimento do raio de luz (Fizeau) era substituída agora, pelo seu desvio angular. Chegando ao valor de 298 000 km/s para a velocidade da luz.

Foucault conseguiu posteriormente comprovar que a velocidade da luz no ar é maior do que na água, ou seja, a luz anda mais devagar na água do que no ar, contribuindo significativamente para a previsão da teoria ondulatória da luz de Hooke e Huygens.

[...] a velocidade da luz muda quando passa de um meio a outro – por exemplo, do ar para a água. Porém, quando permanece no mesmo meio, a velocidade não muda.

[...] a velocidade máxima da luz é atingida no espaço vazio (ou vácuo), e é de 300 mil km/s: você pisca o olho e a luz dá sete voltas e meia em torno da Terra. (GLEISER, 2005).

Vários trabalhos foram apresentados para detectar o movimento da Terra em relação ao éter. Assim em 1962 Babinet sugere que: “talvez o desvio da luz por uma rede de difração pudesse evidenciar o movimento da Terra”. (MARTINS, 1993, p. 65).

Analisando os diversos experimentos realizados nesta época e que obtiveram bons resultados, em 1867 James Clerk Maxwell (1831-1879) divulga seus trabalhos sobre a interferência do movimento da Terra em experimentos terrestres, como o desvio da luz por um prisma, obtendo o mesmo resultado de Arago.

Um pouco antes de sua morte, Maxwell apresentou novos métodos para calcular a velocidade da luz em função do éter, considerando a medida do tempo que a luz demora para mover-se de um ponto a outro quando o movimento é perpendicular ou paralelo à velocidade da Terra.

O resultado apresentou-se não considerável levando Maxwell a tentar associar este fenômeno com os eclipses dos satélites de Júpiter, porém na época não haviam dados precisos para tal associação.

É neste contexto que surge Albert Michelson (1852-1931) em 1881, medindo a velocidade da luz e aperfeiçoando os dispositivos de medida, destacando-se o seu interferômetro. Segundo Rival (1997, p. 96), Michelson procurava demonstrar: “o movimento da Terra no éter imóvel, movimento que devia criar um vento de éter pela relação v/c ou seja, velocidade de deslocamento da Terra no éter pela velocidade da luz.” Realizando um primeiro experimento porém sem grande sucesso.

Neste sentido Michelson recebe a colaboração de Edward Morley para realizar a mesma experiência porém fazendo algumas alterações, entre elas colocando o interferômetro dentro de um tanque de mercúrio, com o objetivo de diminuir qualquer interferência externa.

Rival (1997, p. 97) descreve o experimento que tomou o nome de Michelson-Morley:

[...] desdobrou a luz branca mas cuidando para que um dos feixes desdobrados fosse orientado na direção do deslocamento da Terra, enquanto o outro, que percorria rigorosamente a mesma distância, estava situado perpendicularmente a esse mesmo deslocamento. Os dois feixes, que passavam por um jogo de espelhos, se reuniam finalmente em um ponto de observação, onde produziam franjas de interferências.

Porém novamente o deslocamento das franjas de interferência que deveriam ser observadas, evidenciando o deslocamento, não ocorreu.

O interferômetro de Michelson é o tipo mais fundamental de interferômetro de dois feixes. Ele pode ser utilizado para medir comprimentos de onda com grande precisão. Este aparelho foi originalmente construído por A. Michelson em 1881 e visava comprovar a existência do éter, o meio no qual se supunha na época deveria se propagar a luz. O experimento, como se

sabe, não foi bem sucedido e anos mais tarde, em 1905, A. Einstein publicou o seu famoso trabalho intitulado “Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento” rejeitando definitivamente a existência do éter. A Fig. 1 a seguir mostra esquematicamente, a montagem do interferômetro. (NASCIMENTO, 2005, p. 01).

Na Figura 08 encontra-se o Interferômetro de Michelson para melhor compreensão do experimento.

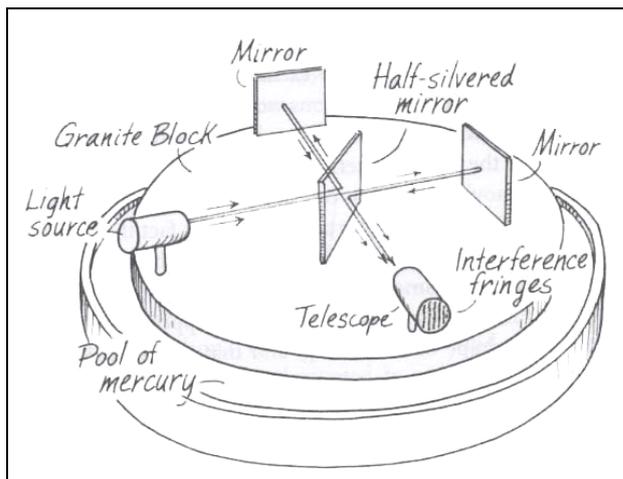


Figura 08: Interferômetro de Michelson. Fonte: www.ifsc.usp.br.

2.3 DESDOBRAMENTOS NO SÉCULO XX

Os trabalhos realizados no campo da ótica durante o século XIX contribuíram de forma decisiva para as duas últimas grandes revoluções ocorridas na Física: a Teoria da Relatividade e a Teoria Quântica.

As ondas eletromagnéticas, estudadas teoricamente por Maxwell e experimentalmente por Hertz, vieram esclarecer a natureza da luz, além de revelar novos fenômenos a ela associados. Por um lado, a busca infrutífera por um meio de propagação das ondas luminosas foi um dos fatores fundamentais no surgimento da Teoria da Relatividade (TR). Por outro, as investigações a respeito da produção de luz e a interação desta com a matéria desembocou na Teoria Quântica (TQ).

Em relação à TR há uma controvérsia entre os historiadores. Alguns advogam que Einstein pouco sabia do resultado negativo do experimento de Michelson-Morley quando escreveu o artigo fundador da TR restrita, mas a maioria defende o contrário. Independente da posição assumida, é inegável que o resultado

de um experimento bem conduzido, repetido diversas vezes, serve como um grande apoio a uma nova teoria que o previra.

Já a contribuição da ótica à TQ é menos polêmica, não obstante tenha levado a uma longa e tortuosa construção da teoria. Inicia-se com os experimentos de Hertz, na última década do século XIX, com as então recém propostas ondas eletromagnéticas. Hertz observou um curioso efeito, e parece não ter se dedicado a estudá-lo: quando alguns tipos de luz incidiam sobre uma superfície metálica, esta ficava eletrizada positivamente. Somente em 1905 o artigo de um jovem físico propõe uma explicação teórica para o fenômeno, lançando mão de um recente preceito surgido na física: a quantização da energia.

Destacamos o título do artigo: “*Sobre um ponto de vista heurístico a respeito da produção e transformação da luz*” (Einstein, 1905). Einstein recebeu o prêmio Nobel de 1921 sobretudo por esse trabalho, onde reconheceu-se como correta a lei que explica o fenômeno.

2.3.1 Teoria da Relatividade Restrita

Em 1905 Einstein publicou o artigo “A eletrodinâmica dos corpos em movimento” que ajudou a solucionar alguns problemas que os físicos da época vinham enfrentando, por meio de dois postulados. Para Einstein, o princípio da relatividade precisava ser mais abrangente para que pudesse ser aplicável e válido para toda a física, não apenas para a mecânica. (GUERRA; BRAGA; REIS, 2007).

A Teoria da Relatividade Restrita é proposta em 26 de setembro de 1905. Através dela são postulados o princípio da relatividade – isto é, que as leis físicas são as mesmas em todos os sistemas de referência inerciais – e o princípio da constância da luz. De acordo com a Relatividade Restrita, se dois sistemas se movem de modo uniforme em relação um ao outro, é impossível determinar algo sobre seu movimento, a não ser que ele é relativo. Isso se deve ao fato de a velocidade da luz no vácuo ser constante, sem depender da velocidade de sua fonte ou de quem observa.

Com isso verifica-se que massa e energia são intercambiáveis – o que resultou na equação mais famosa do século: $E = mc^2$ (energia, "E", é igual à massa, "m", multiplicada pelo quadrado da velocidade da luz, "c²"). Um dos empregos dessa fórmula é na energia nuclear, seja em reatores para produzir eletricidade, seja em armas nucleares. Uma massa pequena de urânio ou plutônio, de alguns quilos, basta para produzir uma bomba capaz de destruir uma cidade, pois a quantidade "E" equivale a "m" multiplicado por 300 mil km/s. (UNIFICADO, 2013).

Além disso, Einstein rejeitou o éter, a complexidade e a estranheza física e considerou supérflua a assunção de um meio material que sustentasse a propagação de ondas eletromagnéticas. (GUERRA et al, 2007; Martins, 2005).

Para Einstein o conceito de repouso absoluto não correspondia a nenhuma propriedade dos fenômenos mecânicos ou eletrodinâmicos e que as leis de Maxwell deveriam ser vistas como as verdadeiras. (GUERRA; BRAGA; REIS, 2007).

Enquanto postulados da teoria da relatividade restrita de Einstein cita-se:

Postulado 1: As leis da física tomam a mesma forma para todos os observadores que se movem uns em relação aos outros com velocidade constante (movimento retilíneo e uniforme).

Postulado 2: Todos os observadores medem o mesmo valor para a velocidade da luz quer esta tenha sido emitida por um corpo em repouso ou por um corpo em movimento retilíneo e uniforme. (CRAWFORD, 2013).

Relevante citar que os postulados de Einstein não fazem nenhuma referência quanto aquelas que seriam as leis da natureza, mas referem-se exclusivamente aos movimentos (retilíneos e uniformes) e aplicam-se a todas as leis da física. Neste sentido, tais postulados apresentam uma natureza cinemática e não dinâmica. (CRAWFORD, 2013).

Os observadores citados no primeiro postulado, conhecido como princípio da Relatividade de Einstein, podem ser denominados observadores inerciais, e as leis da física são iguais para todos os observadores inerciais, ou seja, os observadores inerciais são equivalentes quando analisados sob o prisma das leis da física. (CRAWFORD, 2013).

2.3.2 Teoria Quântica

No seu artigo publicado em 9 de junho de 1905, Einstein usa a hipótese de que a luz comporta-se como se fosse composta por unidades elementares de energia, sendo que estas seriam proporcionais à sua frequência. Ao usar a expressão “*como se*”, percebe-se em Einstein uma resistência em aceitar que a luz pudesse, de fato, ser composta por corpúsculos. (DAVIDOVICH, S/D).

As razões de Einstein para resistir a possível composição da luz por corpúsculos baseavam-se na teoria de Maxwell sobre o campo eletromagnético. Todavia, o apoio de tal teoria era apenas em base experimental, como a demonstração do cientista britânico Thomas Young em 1800 quanto ao caráter ondulatório da luz.

Para Young, um feixe de luz, “passando por um anteparo contendo duas fendas, produz em outro anteparo uma figura de interferência, análoga à obtida quando dois estiletos oscilam sincronicamente em um tanque de água”. (DAVIDOVICH, S/D, p. 01).

“Neste caso, a interferência é obtida quando o máximo da onda circular produzida por um estilete coincide com o mínimo da onda produzida pelo outro, resultando em que a superfície da água não se move”. (DAVIDOVICH, S/D, p. 01).

É necessário que os pinos oscilem de modo sincronizado, pois se isto não ocorrer as regiões em que ocorre a interferência destrutiva se deslocariam rapidamente e o padrão não poderia ser percebido. Para a luz, cada uma das fendas age como se fosse uma fonte secundária, sendo que nas regiões em que o máximo de uma onda coincide com o mínimo da outra onda ocorre a sombra, bem como no tanque de água, é necessário que ocorra o sincronismo das oscilações produzidas pelas duas fendas. Pode-se dizer que há coerência entre as respectivas contribuições. (DAVIDOVICH, S/D).

Não apenas Einstein, mas toda a comunidade científica da época apresentava resistência a esta teoria, apesar de buscarem assimilar a teoria de Planck de 1900, que estabelece uma expressão matemática para o espectro do corpo negro, que se ajusta muito bem aos dados experimentais.

O resultado de Planck respondia a um desafio lançado em 1860 por Gustav Kirchoff, que mostrou que a quantidade de energia emitida por unidade de área, de tempo e de frequência, por um corpo que absorve toda a radiação que incide sobre ele, convertendo-a em calor, sendo este o “corpo negro”, depende exclusivamente da frequência e da temperatura. (DAVIDOVICH, S/D).

Planck publicou em dezembro uma dedução da fórmula apresentada em outubro, com base na hipótese de que a matéria que emite a radiação é constituída de osciladores e suas energias só podem ser múltiplas de uma quantidade básica, proporcional à frequência de oscilação.

A concepção de Planck de que uma energia quantizada, porquanto revolucionária, abrange somente os osciladores materiais, e não entra em confronto assim com a teoria de Maxwell, base da física do final do século dezenove. (DAVIDOVICH, S/D).

O artigo publicado por Einstein em 1905 propõe uma explicação para o efeito fotoelétrico: luz incidindo sobre a superfície de certos metais leva à emissão de elétrons, cuja energia independe da intensidade da luz e parece aumentar com a frequência. A teoria clássica do eletromagnetismo, por outro lado, previa que a energia do elétron deveria aumentar com a intensidade da luz. Einstein propõe que a emissão de um elétron deve-se à absorção de um fóton de energia $h\nu$, sendo h a constante de Planck e ν a frequência da luz. A energia do elétron emitido é dada por $E = h\nu - W$, sendo W a energia necessária para vencer uma barreira de energia que depende do metal. A dependência linear da energia com a frequência, prevista por Einstein em 1905, só é confirmada experimentalmente 10 anos depois, através do trabalho experimental de Millikan na Universidade de Chicago e de Duane e Hunt em Harvard. (DAVIDOVICH, S/D, p. 01).

O efeito fotoelétrico trata-se de uma ocorrência que também depende da luz para sua ocorrência. Este efeito pode ser descrito como a emissão de elétrons de um material metálico, submetido à radiação eletromagnética. Esta forma de radiação é amplamente aplicada no cotidiano e sua aplicação ocorre por meio das células fotoelétricas ou fotocélulas, as quais podem ser de vários tipos como, por exemplo, a célula fotoemissiva e a célula fotocondutiva. (SILVA, 2013).

2.4 INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS EXPERIMENTOS

Várias experiências foram realizadas no século XIX visto a estruturação da óptica ondulatória neste período, suscitando diversos estudos. Discutiremos as implicações destas como a determinação de um referencial absoluto para a descrição dos corpos em movimento, o éter como mencionado no tópico anterior.

Os experimentos de Michelson-Morley desencadearam o que podemos chamar de impulso a visão ondulatória da luz.

2.4.1 O éter como referencial

Antevendo as críticas que suscitavam diante das discussões sobre o éter, este foi utilizado na interpretação de fenômenos luminosos.

De acordo com Mauricio Pietrocola de Oliveira (1993) esta determinação se dá na descrição de fenômenos ópticos onde:

[...] supondo-se a luz como perturbações propagadas num fluido, era fundamentada no conhecimento de basicamente três grandezas: a velocidade de propagação das ondas luminosas, o período ou frequência com que elas eram emitidas pela fonte e a intensidade ou amplitude das mesmas.

Assim sendo Oliveira (1993) ainda coloca que:

Toda interpretação dada aos fenômenos luminosos e a dedução de leis deveria vir direta ou indiretamente da variação ou não dessas grandezas, citando como exemplo a refração que era concebida como o resultado da modificação da velocidade de propagação luminosa quando da passagem da luz de um meio para outro.

No que tange os estudos sobre o éter, este estaria associado a essas grandezas, ao deslocamento das ondas luminosas e as perturbações medidas das mesmas sobre o fluido.

A estas medidas no contexto da óptica ondulatória clássica em relação ao éter, chamamos de velocidades de propagação absoluta e as medidas em relação a outros corpos de velocidades relativa.

A propriedade do éter de se comportar de forma diferente, fluídico para permitir o movimento dos corpos ou rígido para propagar ondas transversais, permitiu indicá-lo como referencial.

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. (OLIVEIRA, 1993, p. 171).

Porém a hipótese do éter arrastado, abriu um leque de estudos durante o século XIX sobre as relações entre a matéria ponderal e o éter, assim como explicar o resultado nulo obtido no experimento de Arago, citado anteriormente,

Neste sentido, explica Pietrocola (1993):

Se todo éter de densidade d' no interior do corpo fosse arrastado a velocidade da onda luminosa seria aumentada/diminuída de toda velocidade do corpo (v); como apenas uma parcela desse éter($d' - d$) é arrastada, a velocidade acrescida/subtraída seria a incógnita a calcular. Chegando ao valor de $(1-1/n^2).v$, que é dito coeficiente de arrastamento parcial do éter.

Fresnell demonstra então com essa fórmula que o resultado do desvio da luz em um prisma em movimento ou repouso é da ordem da relação de v/c .

Alguns trabalhos, como o de Fresnel, vieram materializar a descrição do éter como referencial para descrever os fenômenos físicos, procurando evidenciar sua existência e definir grandezas absolutas e relativas, pressupondo através de experiências as variações nas leis da óptica. E com base nos estudos sobre o arrastamento parcial do éter, se tentou analisar o resultado obtido com o experimento de Michelson- Morley, porém sem sucesso.

2.5 O EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY – CONCEITOS PARA COMPREENSÃO DO RESULTADO.

O resultado esperados da velocidade da Terra em relação ao éter é de $v = 0$. Porém, a velocidade não pode ser sempre zero, considerando-se que a velocidade do aparelho, interferômetro muda conforme as mudanças que ocorrem no movimento da Terra.

Desta forma, Resnick (1971) afirma que:

A experiência não depende unicamente de uma velocidade “absoluta” da Terra através do éter, mas depende também da velocidade variável da Terra em relação ao éter. Tal movimento variável através do éter seria facilmente detectado e medido por experiências precisas, se houvesse um sistema de éter. O resultado nulo parece rejeitar um sistema absoluto de éter.

Com base nesse resultado nulo poder-se-ia interpretar como se a velocidade da luz fosse a mesma em todas as direções em relação a qualquer sistema inercial. O que corrompe o conhecimento de que a medida da luz depende do movimento do observador. Neste sentido “não poderia haver nenhuma experiência experimental para indicar a existência de um sistema inercial único, o éter. (RESNICK, 1971).

Assim sendo, os trabalhos de Fitzgerald e Lorentz, em 1892 tentaram ainda impor o conceito de éter como sistema absoluto, dizendo que “todos os corpos são contraídos na direção do movimento relativo ao éter estacionário por um fator $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ ” (RESNICK, 1993), apresentando sua explicação com base no efeito de contração de Lorentz, em termos de sua teoria eletrônica da matéria o que não foi bem sucedido visto a falta resultados experimentais para sua comprovação.

Outro experimento na tentativa de confirmar a hipótese do éter foi a experiência de Fizeau, citada no segundo tópico deste trabalho. A análise realizada a cerca dos resultados apresentados é de que a interpretação da mesma se dá em “termos de nenhum arrastamento do éter, tanto pelo aparelho, como pela água se movendo através dele, e um arrastamento devido ao meio refratário”. (RESNICK, 1971).

Assim sendo Resnick (1971), ainda coloca que: “a experiência da aberração quando realizada com um telescópio cheio de água leva a exatamente o mesmo resultado e interpretação, sendo que a hipótese de arrastamento do éter é contrariada pelos fatos”.

Desta forma percebemos que as experiências realizadas não conseguiram confirmar a existência experimental do éter. Visando todos os fatores analisados anteriormente indaga-se que ou a eletrodinâmica deve ser modificada ou um novo princípio da Relatividade, que seja consistente com a eletrodinâmica deve surgir a fim de fechar certas lacunas.

3 IMPLICAÇÕES PARA O ENSINO E CONCLUSÕES

A ótica constitui-se uma das mais belas páginas da história da física. Infelizmente este fato acaba por não refletir-se no ensino desse conteúdo. É praticamente consenso a utilização da História da Ciência (HC) no ensino de física,

porém, como alguns autores alertam (Martins, 2006; Forato, 2001), é necessário ser cuidadoso.

O resgate histórico da ótica no século XIX realizado no presente trabalho permitiu identificar diversas incongruências nos livros-texto tradicionais de física. A primeira delas refere-se à controvérsia a respeito da natureza da luz, corpuscular ou ondulatória. Praticamente todos os autores atribuem o triunfo da teoria ondulatória a partir do experimento de dupla fenda de Young, em 1801. Porém, conforme discutimos no capítulo anterior, o debate encerrou-se somente na metade daquele século, quando Foucault conseguiu uma medida mais precisa da velocidade da luz na água, obtendo um valor menor do que no ar.

Os experimentos a respeito da velocidade da luz é um outro tópico pouco abordado nos livros didáticos de ensino médio. As medidas da velocidade no vácuo são razoavelmente tratadas em apenas uma obra do nosso conhecimento (Máximo e Alvarenga, 2010). Porém, os interessantes experimentos aqui discutidos sobre a velocidade da luz em meios materiais são completamente ausentes nos livros.

Experimentos de física, aliás, costumam ser simplesmente ignorados no ensino de física. Esperamos ter ficado claro, ao longo deste trabalho, que a riqueza conceitual, aliada à abordagem histórica dos experimentos, constitui-se num excelente recurso a ser explorado didaticamente.

Um ensaio preliminar foi realizado, paralelamente à construção deste trabalho, com a turma do primeiro semestre deste ano da unidade curricular Projeto Integrador IV, no curso de licenciatura do campus Araranguá. Uma das propostas iniciais foi a reprodução do experimento da roda dentada de Fizeau. A autora também ministrou, a essa turma, um seminário sobre medidas da velocidade da luz. Os estudantes mostraram-se bastante motivados com a construção do experimento e alguns testes foram realizados. Infelizmente o projeto não foi levado a termo, devido a dificuldades técnicas e burocráticas na obtenção dos recursos financeiros. Não obstante, tanto a autora quanto os estudantes da turma puderam se deparar com a árdua tarefa de realizar um resgate histórico do artigo original, bem como perceber as sutilezas e dificuldades de um verdadeiro trabalho experimental em física. O principal obstáculo encontrado foi a confecção da roda dentada, ingrediente essencial para o sucesso da experiência.

Neste trabalho abordamos o assunto Óptica no século XIX dando enfoque para os estudos sobre a luz, como medidas da velocidade da luz no éter e em meios

materiais. Inicialmente nossos estudos voltaram-se a compreender e analisar as diversas contribuições que cientistas fizeram durante os séculos anteriores, lançando assim reflexões e indagações que levaram a busca de respostas mais científicas do que filosóficas, conforme Aristóteles defendia.

Com Galileu Galilei as crenças aristotélicas enfraqueceram e os estudos sobre o caráter e velocidade da luz foram recebendo contribuições de físicos como Issac Newton.

A hegemonia Newtoniana em defesa da teoria corpuscular da luz pendurou durante muito tempo. Porém quando Newton coloca que a teoria corpuscular tem vários lados, com propriedades diferentes, percebemos que ele próprio reconhece que a teoria corpuscular é falha para explicar alguns aspectos da luz. Mais tarde a teoria ondulatória, ganha ênfase através dos estudos de Young, Malus, Fresnel entre outros.

Assim podemos dizer que erroneamente os livros didáticos apresentam, em sua maioria, o experimento de Thomas Young como decisivo para a aceitação da teoria ondulatória da luz. Segundo Pietroski (2008,p.03) no que fala sobre os livros didáticos os conteúdos são apresentados de forma bem simples, sem se importar com o “ caráter ideológico e histórico que esta associado a construção do pensamento evolucionista” como se a ciência fosse algo neutro e não construída ao longo da história. Evidenciando assim, a importância da pesquisa científica como ferramenta de ensino em sala de aula.

Para determinar a velocidade da luz atualmente conhecida formou-se neste período histórico uma ramificação de estudos e descobertas, como: o surgimento do éter, a tentativa de medir a velocidade da Terra em relação a ele, o arrastamento do éter como forma de explicar as incoerências da teoria de Fresnel em relação aos corpos em movimento, o efeito fotoelétrico entre outros.

Experimentos realizados em meios terrestres, como a roda dentada de Fizeau em 1849, para medir a velocidade da luz, levantou indagações durante esta pesquisa, quanto a veracidade de sua execução considerando-se a distância usada para sua realização e o tipo de material, dentro da tecnologia de que se dispunham naquela época.

De qualquer modo até o final do século XIX a luz era aceita como uma onda que se propagava no éter, o que somente mudou no século XX com o surgimento da teoria da relatividade, que explicava vários fenômenos sem utilizar-se da existência

do éter, e que traria uma nova visão para o caráter da luz, que hora se comporta como onda, como defendia Huygens e hora como uma partícula como defendia Newton.

Assim concluímos que varias teorias foram elaboradas durante a história da ciência e permaneceram por muito tempo aceitas até que novas indagações pela busca de explicações de fenômenos da natureza, como a luz, foram sendo respondidas e também que os experimentos são muito importantes na construção da ciência. Sendo assim, o processo de construção do conhecimento científico não é algo linear porque as teorias são derrubadas, retomadas, aperfeiçoadas durante esta busca incessante de conhecer o universo.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, Valmar Carneiro et al. Uma visualização do princípio de Huygens-Fresnel na obtenção de um padrão de difração. **Rev. Bras. Ensino Fís.** 2012, vol.34, n.3, pp. 1-5. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v34n3/a01v34n3.pdf>> Acesso em: 25 out. 2013.

BASSALO, José Maria Filardo. A crônica da ótica clássica: Parte III (1801 – 1905). **Cad. Cat. Ens. Fís.**, Florianópolis, 6 (1): p. 37-58, abr. 1989. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/viewFile/7719/15172>> Acesso em 25 out. 2013.

_____. A crônica da ótica clássica. **Cad. Cat. Ens. Fís.**, Florianópolis, 4 (3): p. 140-150, dez. 1987.

BRAGA, Marco. GUERRA, Andreia. REIS, José Cláudio. O papel dos livros didáticos franceses do século XIX na construção de uma concepção dogmático-instrumental do ensino de física. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 25, n. 3: p. 507-522, dez. 2008.

CRAWFORD, Paulo. **Teoria da relatividade restrita.** Disponível em: <http://cosmo.fis.fc.ul.pt/~crawford/aulas/12_rel.pdf> Acesso em: 15 out. 2013.

CRUZIO, Franklin. **Força de Lorentz.** Disponível em: <http://www.ufpi.br/subsiteFiles/df/arquivos/files/Fis_Exp_III_08-B-forca%20de%20lorentz%2010.pdf> Acesso em: 15 out, 2013.

DARRIGOL, O., *Electrodynamics from Ampère to Einstein*, Oxford University Press, 2000.

DAVIDOVICH. Luiz. **Einstein e a mecânica quântica.** Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/~ldavid/arquivos/Einstein%20e%20a%20Mecanica%20Quantica%20-%20Ciencia%20e%20Meio%20Ambiente.pdf>> Acesso em: 23 out. 2013.

FORATO, T. C. M., PIETROCOLA, M., MARTINS, Roberto de Andrade. A historiografia e a natureza da ciência na sala de aula. **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 28, n. 1: p. 27-59, abr. 2011.

GLEISER, Marcelo. **O Mistério da luz.** 05 set. 2005. Disponível em: <<http://www.jornaldaciencia.org.br/Detail.php?id=31163>> Acesso em: 25 out. 2013.

GUERRA, Andreia. BRAGA, Marco. REIS, José Cláudio. Teoria da relatividade restrita e geral no programa de mecânica do ensino médio: uma possível abordagem. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. V. 29. N. 4. 2007.

MAGALHÃES, Anderson. Transformações de Lorentz. TCC (Graduação em Matemática) – **Instituto Superior de Educação** de Itabira. Itabira, 2007.

MARTINS, Roberto de Andrade. O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra, antes dos experimentos de Michelson e Morley (1818-1880). **Cad. Bras. Ens. Fís.**, v. 29, n. 1: p. 52-80, abr. 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2012v29n1p52/21603>> Acesso em: 25 out. 2013.

MARTINS, Roberto de Andrade, A dinâmica relativística antes de Einstein. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. V. 27. N. 1. 2005.

MÁXIMO, A., ALVARENGA, B. Curso de Física v.1, Ed Harbra, São Paulo, 2010.

NASCIMENTO, Edmar. **Medidas com o intrferômetro de Michelson**. 2005. Disponível em: <<http://www.fis.ufba.br/dfes/estrutura1/roteiros/Michelson.pdf>> Acesso em: 25 out. 201

OLIVEIRA, Maurício Pietrocola de. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da terra sobre a propagação da luz. **Cad.Cat.Ens.Fís.**, v.10, n.2: p.157-172, ago.1993. Disponível em: <journal.ufsc.br/index.php/fisica/article/download/7281/14920> Acesso em: 25 out. 2013.

PIETROCOLA, M., O Éter Luminoso como Espaço Absoluto,

_____, A Ciência Francesa e a Óptica dos Corpos em Movimento, Revista SBHC, n. 13, 1995.

_____, Fresnel e o Arrastamento Parcial do Éter, Cad. Bras. Ens. Fis, vol. 10, n.2, 1993.

PIETROSKI, Edviges. Aspectos históricos e ideológicos da teoria da evolução biológica.2008. Disponível em:< <http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br>> Acesso em: 29 de Nov. de 2013.

RIVAL, M. **Os Grandes Experimentos Científicos**. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Editor, 1997.

RESNICK, R., Introdução à Relatividade Especial, Edusp, 1971.

SEARA da ciência. **A velocidade da luz**. Disponível em: <<http://www.seara.ufc.br/especiais/fisica/veluz/veluz2.htm>> Acesso em: 25 out. 2013.

SILVA, Marco Aurélio. **O efeito fotoelétrico**. Disponível em: <<http://www.brasilecola.com/fisica/o-efeito-fotoeletrico.htm>> Acesso em: 25 out. 2013.

UNIFICADO. **Teoria da Relatividade revolucionou a Física do século XX**. Disponível em: <<http://www.unificado.com.br/calendario/09/relatividade.htm>> Acesso em: 20 out. 2013.