



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
FÍSICA-LICENCIATURA



Elaboração de um Objeto Educacional baseado no Interferômetro de Michelson

Maylson Marckesan Silva de Oliveira

Caruaru-PE
Outubro de 2014

Maylson Marckesan Silva de Oliveira

**Elaboração de um Objeto Educacional baseado no
Interferômetro de Michelson**

Monografia de Graduação apresentada ao
Núcleo de Formação Docente do Centro Aca-
dêmico do Agreste da Universidade Federal
de Pernambuco como requisito parcial para
a obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador

Prof. Dr. Charlie Salvador Gonçalves

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE - NFD

Caruaru - PE

Outubro de 2014

O48e Oliveira, Maylson Marckesan Silva de.
Elaboração de um objeto educacional baseado no interferômetro de Michelson. / Maylson Marckesan Silva de Oliveira. – Caruaru, 2014.
53 f. il.; 30 cm.

Orientador: Profº Drº Charlie Salvador Gonçalves.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Física - Licenciatura, 2014.
Inclui bibliografia e apêndices.

1. Física moderna. 2. Experimentos. 3. Interferômetros. 4. Ensino de Física. I. Gonçalves, Charlie Salvador (Orientador). II. Título.

371.12 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2014-154)

Monografia de Graduação sob o título *Elaboração de um Objeto Educacional baseado no Interferômetro de Michelson* apresentada por Maylson Marckesan Silva de Oliveira e aceita pelo Núcleo de Formação Docente do Centro Acadêmico do Agreste da Universidade Federal de Pernambuco, sendo aprovada por todos os membros da banca examinadora abaixo especificada:

João F. L. de Freitas
Coordenador do curso de Física-Licenciatura

Charlie S. Gonçalves
Orientador e 1º Examinador

Sérgio L. Campello
2º Examinador

Ernesto A. V. Rodriguez
3º Examinador

Caruaru - PE, 14 de Outubro de 2014.

Dedico este trabalho à minha família, em especial aos meus pais, e a todos que me
incentivaram.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da vida. A minha mãe pelas palavras de incentivo e por acreditar em mim incondicionalmente, ela é peça fundamental nesse trabalho. A Thathawanna pela dedicação e por me apoiar e me aturar em momentos difíceis. Ao professor Charlie pela paciência e dedicação. À professora Kátia Calligaris por orientações que me levaram a caminhos importantes. Aos amigos que me ajudaram diretamente no trabalho: Lucas Terra, Elias e Dydy, vocês também fazem parte dele! Aos meus colegas de curso pelas sugestões e momentos de descontração. E aos professores que participaram da minha formação.

O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.

Isaac Newton

RESUMO

Os resultados inusitados da física moderna são de longe os grandes atrativos no mundo da física, aparecendo com grande destaque em livros. No entanto, levam os professores e estudantes a um grande desconforto no que diz respeito à visualização ou possibilidade de reprodução dos experimentos. Neste trabalho propomos a elaboração de um objeto educacional no formato de um roteiro de experimento, com a montagem baseado no interferômetro de Michelson. Este é um dos mais famosos e sofisticados experimentos do fim do século XIX e foi desenvolvido para detectar o movimento relativo da Terra através do éter. Apresentaremos um equipamento construído com materiais facilmente encontrados no comércio local. É uma alternativa lúdica e acessível para o ensino de física moderna.

Palavras-chave: física moderna, objeto educacional, experimento, interferômetro.

Lista de figuras

1	Pulso produzido em uma corda.	p. 19
2	Esquema representativo do interferômetro. Na figura da esquerda, vemos uma representação dos feixes emitidos; na figura da direita vemos uma representação dos feixes que são refletidos.	p. 25
3	Padrão de interferência do tipo franjas	p. 26
4	Distâncias percorridas pelos jet-skis; diagrama das velocidades para o jet-ski 2.	p. 27
5	Divisor de feixes de um interferômetro comercial.	p. 34
6	Lâmina para microscopia.	p. 35
7	Lamínula para microscopia.	p. 35
8	Peca de vidro de 9 mm.	p. 36
9	Mesa-óptica.	p. 37
10	Divisão dos feixes (figura fora de escala).	p. 38
11	Divisão dos feixes com um divisor de menor espessura (figura fora de escala).	p. 38
12	Cantoneira usada para montagem dos suportes.	p. 39
13	Cantoneira cortada.	p. 40
14	Imã de Neodímio retirado de um disco rígido de computador.	p. 40
15	Goniômetro.	p. 42
16	Montagem final do aparato.	p. 43
17	Montagem final do aparato com sistema de suspensão pneumática em funcionamento.	p. 43
18	Análise da vibração da bancada e da mesa óptica ao longo do eixo x . .	p. 45

19	À esquerda, temos a figura de interferência óptica formada pelo interferômetro didático; à direita, temos a figura de interferência óptica formada pelo interferômetro de baixo custo.	p. 45
----	--	-------

Sumário

1	Introdução	p. 12
2	A Experimentação no Ensino e os Objetos Educacionais	p. 14
2.1	O uso de experimentos no ensino de física	p. 14
2.2	Os objetos educacionais	p. 15
3	A Física Moderna	p. 18
3.1	Uma breve introdução ao surgimento da física moderna	p. 18
3.2	As equações de Maxwell e a natureza ondulatória da luz	p. 19
3.3	O Éter e a concepção do interferômetro	p. 23
3.4	O Interferômetro e a relatividade	p. 26
3.5	A natureza corpuscular da luz e o LASER	p. 29
4	Desenvolvimento do aparato experimental	p. 32
4.1	Avaliando a viabilidade da Montagem	p. 32
4.1.1	Estudo do histórico do equipamento original	p. 32
4.1.2	Observação do fenômeno com equipamento na configuração original	p. 33
4.1.3	Reprodução do fenômeno: testando novos componentes	p. 33
4.2	A montagem	p. 37
4.2.1	O Divisor do Feixe	p. 37
4.2.2	Os Suportes	p. 39
4.2.3	Os Espelhos	p. 41
4.2.4	Os Goniômetros	p. 41

4.2.5 A Mesa-óptica	p. 42
5 Resultados	p. 44
6 Considerações finais	p. 47
Apêndice A – Franjas de Interferência	p. 48
Superposição de ondas	p. 48
Apêndice B – Tabela de materiais utilizados	p. 50
Referências	p. 51

1 Introdução

Para os alunos do ensino médio, a física é uma das disciplinas mais difíceis de ser compreendida, pela forma em que ela é ensinada atualmente. Geralmente a física é trabalhada de uma forma completamente abstrata, de modo que, para o estudante, ela transforma-se numa ciência sem significação real. O ensino é realizado de uma forma bastante mecânica: as informações são repassadas, bem como as demonstrações do uso das fórmulas, e o educando passivamente reproduz o que foi visto, sem questionar o que foi aprendido como apontam MENEGOTTO (2008) e ROSA (2005) em seus trabalhos. Esse sentimento intensifica-se quando o assunto é Física Moderna e Contemporânea OSTERMANN (2000).

ARRUDA (1991), PEREIRA (2001), ARAÚJO (2003), FOLMER (2009) e MOREIRA (2011) apontam como alternativa para trazer mais significado as aulas de física, ampará-las com experimentos que mostrem aplicações (e/ou explicações) aos assuntos abordados em sala de aula; essa alternativa é corroborada pelas Orientações Educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (ou PCN+):

É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável (BRASIL, 2002, p. 84)

Além de que, se a montagem de tais experimentos for realizada com os colegiais, podemos chamar a atenção deles para as dificuldades e condições encontradas no contexto histórico do experimento, remetendo ao conjunto de competências “contextualizar social ou historicamente os conhecimentos” explicitados pelos Parâmetros Curriculares Nacionais para o ensino médio (BRASIL, 2002). Mas aí, chegamos a um obstáculo: kits experimentais sobre física moderna são de alto custo, tornando-se inviável sua obtenção. Desta forma, apresentamos um interferômetro baseado na configuração de Michelson, utilizando materiais de baixo custo, e de fácil obtenção.

O interferômetro de Michelson foi um experimento com o objetivo inicial de medir a velocidade relativa entre a terra e um meio material chamado de éter, que seria o referencial absoluto (OLIVEIRA, 2005, p. 92). A ideia principal do experimento é dividir um feixe de luz (através de um espelho semi-refletor), de modo que os raios divididos se encontrassem num anteparo, formando uma figura de interferência óptica. O interferômetro deveria viajar com velocidade $\vec{v}$ e os feixes oriundos da divisão percorreriam direções perpendiculares, onde uma delas seria a direção do deslocamento do aparato. A ideia seria verificar se a lei de adição de velocidades valeria para a luz.

Como a luz viaja a uma velocidade muito grande, o aparato deveria deslocar-se com uma velocidade consideravelmente alta, o mais próximo possível da velocidade da luz, para que houvesse uma mudança perceptível no padrão de interferência. Nesse ponto chega-se a um obstáculo evidente: o que utilizar para que o interferômetro se desloque a uma velocidade considerável, levando em conta a velocidade da luz? Para a tecnologia atual, isso já demonstra ser de certa complexidade; o que dizer para o contexto histórico de Michelson? Usando de sua genialidade, Michelson decidiu usar o movimento da terra em relação ao sol como “transporte” para seu aparato. Como a Terra se move a uma velocidade de aproximadamente $3 \cdot 10^4 m/s$, isso deveria causar um efeito perceptível na realização do experimento, considerando que a velocidade da luz é de cerca de $3 \cdot 10^8 m/s$.

Então, a utilização desse aparato no ensino de física moderna na educação básica pode propiciar uma motivação para que os professores da área trabalhem essa parte da física, tão importante e atual, mas que é “esquecida” pela grande maioria dos educadores, e consequentemente torna-se algo inexistente para os alunos pois ensinar utilizando métodos alternativos à explanação com o auxílio do quadro (utilizando experimentos, por exemplo) é comumente considerado mais prazeroso e produtivo tanto para os educadores quanto para os alunos.

A partir disso tomou-se como objetivo desenvolver um objeto educacional baseado no interferômetro de Michelson para o enriquecimento da aula sobre conceitos de relatividade restrita no ensino médio. Mais especificamente, conhecer o contexto histórico do experimento e desenvolver um aparato experimental reproduzível, utilizando materiais de fácil obtenção.

2 A Experimentação no Ensino e os Objetos Educacionais

2.1 O uso de experimentos no ensino de física

A física é uma disciplina que tem por objetivo estudar os fenômenos da natureza, e descrever esses fenômenos através de leis e postulados. No ensino de física é comum os docentes focarem na descrição dessas leis do ponto de vista puramente matemático, dando ênfase à aplicação das fórmulas e resolução de exercícios, muitas vezes sem relacionar os conceitos físicos envolvidos. Como nos traz LOZADA:

a resolução de problemas consiste em sua maioria na aplicação de fórmulas sem aparente relação com o conceito físico, constituindo-se em mecanização de procedimentos, propagando-se o que se tem denominado de “matematização” do Ensino de Física. Este processo de “matematização” verificado em nossas escolas nas aulas de Física, caracteriza-se pela excessiva ênfase na apropriação de conceitos matemáticos para resolver problemas de Física, sem conexão com os fenômenos físicos em estudo. (LOZADA, 2007, p.0)

Os motivos que costumam ser indicados para explicar as dificuldades na aprendizagem da Física são dos mais diversos e variados. Além das questões referentes mais especificamente aos educadores, são apontados a qualidade dos conteúdos desenvolvidos em sala de aula; a ênfase excessiva na Física clássica e o quase total esquecimento da Física moderna; o enfoque demasiado na chamada Física matemática em detrimento de uma Física mais conceitual, como trazido por LOZADA (LOZADA, 2007, p.0); o distanciamento entre o formalismo escolar e o cotidiano dos alunos; a falta de contextualização dos conteúdos desenvolvidos com as questões tecnológicas; a fragmentação dos conteúdos e a pouca valorização da atividade experimental e dos saberes do aluno.

Sendo assim, se mostra mais que essencial a utilização de experimentos em sala de aula, pois a utilização desses aparatos podem ajudar a contextualizar os conteúdos, desenvolver as questões tecnológicas, valorizar os saberes prévios dos alunos, além de incentivar

o pensamento lógico e crítico desses indivíduos que, muito comumente, são tratados como seres que devem unicamente absorver as informações dadas pelos professores, sem a necessidade de questionar para melhor entender o assunto.

Um experimento pode ser concebido considerando-se diferentes abordagens. Classicamente, os educadores utilizam os experimentos de forma que o aluno somente se serve daquele aparato e do método, sem o incentivo a discussão, fazendo com que o aprendiz apenas manipule os parâmetros sem nada compreender do fenômeno.

Geralmente esse tipo de procedimento é utilizado por professores que possuem pouco ou nenhum domínio da disciplina, mecanizando a prática que, ao invés de ser prazerosa e extremamente rica em conhecimentos, se torna pobre e sem nenhum significado real.

E segundo os Parâmetros Curriculares Nacionais, o ensino médio deve preparar para a vida, qualificar para a cidadania e capacitar para o aprendizado permanente, levando em conta três objetivos educacionais: representação e comunicação; investigação e compreensão; e contextualização sociocultural (Parâmetros Curriculares Nacionais, 2002). Podemos relacionar esses três objetivos com o trabalho de experimentação em sala de aula. Na atividade experimental há a coleta e representação de dados, que podemos relacionar com o objetivo de representação e comunicação; após a coleta de dados, há a investigação e compreensão dos fenômenos envolvidos no experimento, remetendo ao segundo objetivo; simultaneamente a esses dois processos, podemos enquanto tutores, integrar a contextualização sociocultural do experimento. Além de que a própria compreensão dos conceitos teóricos da física é maximizada através do uso de experimentos. Alguns autores afirmam até que é inconcebível o ensino de física desvinculado da experimentação, como afirma Rodolpho Caniato: “Estudar Física sem ser através da experiência é como fazer curso de natação por correspondência” (PEREIRA, 2001, p. 65).

2.2 Os objetos educacionais

Nesse contexto de experimentação no ensino vamos encaixar os chamados objetos educacionais (ou objetos de aprendizagem). Segundo TAROUÇO et al (2003, p. 2), objetos educacionais podem ser simplesmente definidos como qualquer recurso, adicional ao processo de aprendizagem, que podem ser reutilizados para apoiar e maximizar as situações de aprendizagem onde são utilizados.

Existem vários autores que nomeiam estes recursos educacionais como: software educacional, aplicações multimídia, conteúdos instrucionais, objetos de conhecimento e etc.

Genericamente, esses recursos educacionais, são titulados de objetos de aprendizagem, de acordo com a terminologia adotada pelo *Comitê de Normas de Tecnologia de Aprendizagem* (LTSC) do *Instituto de Engenheiros Eletricos e Eletronicos* (IEEE) (SANTOS, 2011). Assim:

o conceito dominante de objetos de aprendizagem é o de qualquer recurso digital usado com objetivo educacional como chegam à conclusão Hoffmann et al. (2007). Lembram os autores que tais objetos tem que formar blocos de informações e estar inseridos em um determinado ambiente de aprendizagem, precisando apresentar as seguintes características: reusabilidade, adaptabilidade, granularidade, acessibilidade, durabilidade e interoperabilidade (SILVA et al, 2010, p. 94).

É importante salientar que os objetos de aprendizagem devem ser, preferencialmente, criados em pequenas unidades com o propósito de maximizar o armazenamento e a reutilização (no mesmo conjunto), e fazendo com que, seja possível aumentar o número de situações educativas em que se pode utilizar o mesmo recurso facilitando assim o trabalho do indivíduo que irá manuseá-lo, pois este poderá não precisar construir novos aparatos para um novo contexto. Isso configura as características de reusabilidade e adaptabilidade citadas anteriormente.

Os objetos de aprendizagem são agrupados em repositórios e/ou referatórios. Em linhas gerais um repositório é um site na web que contém diversos recursos digitais úteis para a aprendizagem formal ou não-formal, sendo alguns repositórios essencialmente institucionais e outros multi-institucionais. Um referatório, por outro lado, é um site na web que não faz o armazenamento dos recursos propriamente ditos, mas sim, indica a quem tem interesse em aprender onde encontrar a informação desejada, assim, é essencialmente um tipo de catalogador que indica quais são os repositórios que detêm recursos sobre determinado assunto.

A partir da definição, podemos entender que um roteiro de um experimento disponível virtualmente pode ser considerado um objeto educacional. Daí, faz-se necessário diversas iniciativas de sites para armazenamento de objetos de aprendizagem. Realizando uma busca encontramos quase 40 repositórios e referatórios onde podemos encontrar os mais diversos tipos de objetos educacionais. Refinando a pesquisa e utilizando como critérios acesso aberto e gratuito, recursos e navegação predominantemente em língua portuguesa, recursos de uso potencial em múltiplos níveis educativos e instituições que oferecem a informação de reconhecida seriedade, encontramos cerca de 15 repositórios e referatórios.

Um dos repositórios mais conhecido no Brasil é o Banco Internacional de Objetos Educacionais (BIOE), criado pelo MEC em 2008 (em parceria com o Ministério da Ci-

ência e Tecnologia (MCT), Rede Latino-americana de Portais Educacionais (RELPE), Organização dos Estados Ibero-americanos (OEI) e algumas universidades brasileiras) que reúne diversos tipos de objetos educacionais como animações, simulações, roteiros de experimentos, hipermídias, vídeo aulas, arquivos de áudio, entre outros. O objetivo do BIOE é compartilhar todo tipo de objeto educacional através de sua página virtual. Para submeter trabalhos no referido repositório educacional digital é necessário que o autor do trabalho possua cadastro no mesmo. Após submetido, o trabalho passará por uma série de avaliações até poder ser disponibilizado no banco.

Nosso objetivo será a construção de um interferômetro baseado na montagem de Michelson, utilizando materiais de fácil obtenção e de baixo custo, para disponibilizar um roteiro (ver anexo) que possibilite a reprodução desse experimento. Dessa forma estaremos elaborando um objeto educacional do tipo roteiro de experimento, que será submetido ao BIOE.

Com essa construção estaremos também contribuindo para a maior inserção da física moderna no ensino médio, pois não existirá mais a dificuldade financeira, devida aos altos custos dos aparatos vendidos comercialmente, possibilitando assim que os educadores possam tornar a aula mais produtiva e prazerosa.

3 A Física Moderna

3.1 Uma breve introdução ao surgimento da física moderna

Até o século XIX, as áreas da física (mecânica, termodinâmica, óptica, eletromagnetismo, etc.) alcançaram um alto grau de desenvolvimento teórico. Roberto de Andrade Martins exemplifica essa questão citando a mecânica clássica:

O desenvolvimento da mecânica clássica tinha atingido uma grande precisão, permitindo o cálculo tão exato dos movimentos dos planetas, que qualquer pequena diferença entre a teoria e as observações precisava ser considerada seriamente. Foi investigando diferenças minúsculas desse tipo que a astronomia do século XIX descobriu a existência do planeta Netuno: sua existência foi prevista matematicamente por Urbain Le Verrier, e depois ele foi observado (em 1846) por Johann Gottfried Galle (MARTINS, 2012).

Como podemos notar, as teorias já estavam muito bem desenvolvidas. Vários cientistas da época afirmaram: “não há nada de novo para ser descoberto na física, tudo o que resta são medições mais e mais precisas” (SCHULZ, 2007, p. 509). Mas, “pressentindo” uma mudança na física atual, o Lorde Kelvin afirmou:

A beleza e claridade da teoria dinâmica, que coloca calor e luz como modos de movimento, está presentemente obscurecida por duas nuvens. I. A primeira apareceu com a teoria ondulatória da luz, desenvolvida por Fresnel e o Dr. Thomas Young; envolvendo a questão de como pode a Terra mover-se através de um sólido elástico, como o é essencialmente o éter luminífero? II. A segunda é a doutrina de Maxwell-Boltzmann sobre a equipartição de energia (KELVIN apud SCHULZ, 2007, p. 510).

Para a imensa surpresa da comunidade de físicos, as duas nuvens a qual o Lorde Kelvin se referia acabaram por revolucionar a física até então conhecida. As duas nuvens se desenvolveram e transformaram-se nos pilares do que chamamos atualmente de Física Moderna.

3.2 As equações de Maxwell e a natureza ondulatória da luz

Por volta de 1870, O físico James Clerk Maxwell sintetizou em um grupo de 20 equações, todos os fenômenos elétricos e magnéticos; mais tarde através da evolução do cálculo vetorial esse grupo passou a ser resumido em apenas 4 equações e, comumente, tornaram-se conhecidas como as “equações de Maxwell” (MAXWELL, 1865). Antes de abordar as equações de Maxwell, vamos fazer um breve estudo sobre ondas.

Inicialmente, imaginaremos um pulso em uma corda (figura 2). O pulso num instante $t_0 = 0$ tem uma forma que pode ser representada por uma função do tipo $y = f(x)$. Em um instante posterior t , o pulso está numa posição mais afastada, em relação ao instante inicial. Nessa nova posição, podemos representar a forma do pulso como sendo $y = f(x')$.

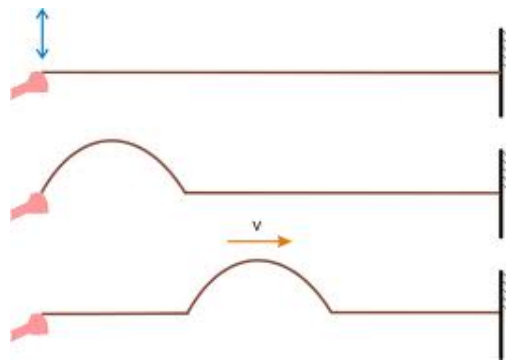


Figura 1: Pulso produzido em uma corda.

Disponível em <<http://ondasdeenergia.blogspot.com.br/>>

Se o pulso se moveu do instante t_0 ao instante t para a direita com velocidade v , podemos relacionar x e x' como:

$$x' = x - vt. \quad (3.1)$$

Logo, no instante t , a forma do pulso pode ser representada como sendo:

$$y = f(x - vt). \quad (3.2)$$

No caso do pulso movendo-se para a esquerda, representamos a forma do pulso como sendo:

$$y = f(x + vt). \quad (3.3)$$

Essas funções são chamadas de funções de onda. A partir da função de onda, extraímos todas as informações a respeito do movimento do pulso (ou onda) que estamos analisando. Porque um movimento ondulatório será totalmente conhecido, se soubermos a dependência temporal e espacial da função de onda. Definindo a variável:

$$u = x \pm vt. \quad (3.4)$$

Então a função de onda se tornará:

$$y = f(u). \quad (3.5)$$

Para encontrar a variação vertical da onda em função do deslocamento em x, vamos derivar (3.5) em relação a x:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (3.6)$$

$$\longrightarrow \frac{\partial y}{\partial u} = y'(u) \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 1 \quad \Rightarrow \frac{\partial y}{\partial x} = y'(u) \quad \Rightarrow \frac{\partial y}{\partial x} = y'(x \pm vt). \quad (3.7)$$

Derivando (3.5) duas vezes em relação a x:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = y''(x \pm vt). \quad (3.8)$$

Agora, vamos determinar a variação vertical da onda em função do tempo derivando (3.5) em relação a t:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (3.9)$$

$$\longrightarrow \frac{\partial y}{\partial u} = y'(u) \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \pm v \quad \Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = \pm v y'(u) \quad \Rightarrow \frac{\partial y}{\partial t} = \pm v y'(x \pm vt). \quad (3.10)$$

Derivando (3.5) duas vezes em relação a t:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \pm v [\pm v y''(x \pm vt)] \Rightarrow \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = v^2 y''(x \pm vt). \quad (3.11)$$

Substituindo (3.11) em (3.8) vamos obter:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (3.12)$$

Esta última expressão é conhecida como equação de onda; podemos interpretá-la como uma variação espacial resulta em uma variação temporal que se propaga no espaço e no

tempo com velocidade v . Assim, ela descreve como ocorre a propagação das ondas sejam elas mecânicas ou eletromagnéticas. Generalizando para o caso tridimensional, a equação de onda pode ser escrita da seguinte forma:

$$\nabla^2 y = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}. \quad (3.13)$$

Voltando ao século XIX, todos os fenômenos elétricos e magnéticos foram fundamentados por Maxwell num grupo de quatro equações, as chamadas equações de Maxwell, mostradas a seguir:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (3.14)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (3.15)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.16)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (3.17)$$

A partir das equações de Maxwell, vamos chegar à expressão para a equação de uma onda eletromagnética. Considerando o espaço livre (vácuo), onde não há cargas elétricas nem correntes, as equações de Maxwell se tornam:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0, \quad (3.18)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0, \quad (3.19)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.20)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}. \quad (3.21)$$

Calculamos então o rotacional da equação (3.20):

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B}). \quad (3.22)$$

Onde invertemos a ordem da derivada em t e do rotacional; podemos reescrever o lado

esquerdo da expressão (3.22) a partir da seguinte propriedade do cálculo vetorial:

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{A}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}. \quad (3.23)$$

Reescrevendo o lado esquerdo de (3.22) e substituindo (3.21) no lado direito de (3.22):

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right). \quad (3.24)$$

Substituindo o valor da equação (3.18) no lado esquerdo da expressão anterior, obtemos:

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (3.25)$$

Ou seja, uma variação espacial do campo elétrico resulta em uma variação temporal que se propaga no espaço e no tempo com velocidade definida por uma constante. Realizando o mesmo processo para a lei de Ampère-Maxwell, vamos obter analogamente:

$$\nabla^2 \vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}. \quad (3.26)$$

Note que as equações (3.25) e (3.26) são equivalentes a equação de uma onda tri-dimensional [equação (3.13)], o que nos mostra que a partir das equações de Maxwell obtemos equações de ondas para propagação dos campos elétricos e magnéticos no vácuo; comparando os termos, vemos que a velocidade dessas ondas é representado pelo produto de duas constantes, o que nos diz que a propagação da onda dos campos elétricos e magnéticos (de agora em diante chamada de onda eletromagnética) sempre terá o mesmo valor (no vácuo) :

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \varepsilon_0 \quad \Rightarrow \quad v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}. \quad (3.27)$$

Analisando dimensionalmente, a constante μ_0 tem unidade de $\frac{N}{A^2}$ e a constante ε_0 tem unidade de $\frac{A^2 \cdot s^2}{N \cdot m^2}$. Fazendo o produto entre as unidades das duas constantes, obtemos:

$$\mu_0 \cdot \varepsilon_0 = \frac{s^2}{m^2}. \quad (3.28)$$

Calculando a raiz do inverso de $\mu_0 \cdot \varepsilon_0$:

$$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{m}{s}. \quad (3.29)$$

Observe que a unidade da constante $\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ é exatamente a unidade de velocidade, como esperado. Substituindo os valores das constantes, obtemos o valor da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas, que é o valor da velocidade da luz no vácuo:

$$\Rightarrow v \cong 2,99792 \cdot 10^8 m/s. \quad (3.30)$$

Segundo Maxwell:

A velocidade das ondas transversais em nosso meio hipotético, calculada a partir dos experimentos eletromagnéticos dos Srs. Kohlrausch e Weber, concorda tão exatamente com a velocidade da luz, calculada pelos experimentos do Sr. Fizeau, que é difícil evitar a inferência de que a luz consiste nas ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos (MAXWELL, 1865, p. 499).

A partir desse resultado, já poderíamos desconfiar da natureza da luz. Aliado ao fato de que a luz possui propriedades (como a polarização) idênticas às observadas nas ondas eletromagnéticas, a luz passou a ser considerada como uma onda eletromagnética. Esse foi um grande momento para a história da Física; a eletricidade e o magnetismo haviam nascido e se desenvolvido em caminhos separados, até que os trabalhos de Oersted e de Faraday mostraram que esses dois ramos eram complementares um ao outro; agora, Maxwell integrava ao eletromagnetismo os fenômenos ópticos, realizando uma das grandes unificações da física.

3.3 O Éter e a concepção do interferômetro

A partir da unificação do eletromagnetismo com a óptica, surgiu uma questão interessante: se a luz é uma onda, qual seria seu meio de propagação? Chesman ressalta:

Conforme se sabia naquela época, os modelos mecânicos, baseados na teoria Newtoniana, preveem a existência de um meio material para que uma onda se propague. Mas faltavam respostas para questões do tipo: como pode uma onda eletromagnética se propagar no vácuo? Ou, como uma onda pode se propagar no “nada”? Ainda, qual o valor da velocidade da luz emitida de um corpo em movimento? (CHESMAN, 2004, p. 62)

Para os cientistas da época, este meio de propagação para a luz deveria então existir logo formularam a hipótese de que haveria um meio que preenchesse todo o espaço vazio, inclusive na aparente ausência total de matéria (vácuo). Este meio ficou conhecido como o éter. Este éter representava inclusive, a possibilidade do chamado “referencial absoluto”.

A propósito, o éter deveria ter propriedades bastante controversas como explica J. M. Lévy-Leblond:

De fato, esse éter tinha características bem estranhas: por um lado, a luz se propagava aí a uma velocidade tão considerável (os 300.000 km/s) que esse meio devia ser concebido como muito rígido (seus corpúsculos deviam estar muito estreitamente acoplados para reagir com rapidez aos deslocamentos de uns em relação aos outros); por outro, dado que a luz se propaga nos recintos em que não há nenhum gás usual ou no espaço intersideral, esse meio devia ser muito fluido, de forma a passar através de toda matéria comum. (LÉVY-LEBLOND, 2004, p. 108).

Logo, o éter deveria ser altamente rígido, e ao mesmo tempo, excepcionalmente fluido. Além de ser completamente transparente para permitir a propagação da luz das estrelas. É bastante difícil conceber um meio com propriedades tão controversas.

Mesmo com propriedades tão estranhas e incomuns, a hipótese do éter foi amplamente aceita pela comunidade científica da época. Conforme afirma Martins: “Michelson, como a quase totalidade dos físicos da época, não colocava em dúvida a existência do éter (...)” (MARTINS, 1998, p. 266).

Acreditando na existência do éter, Michelson se propôs a medir a velocidade da Terra através do éter, devido à Terra ser o sistema mais rápido que conhecemos, com cerca de 30 km/s. Para isso ele construiu um “interferômetro”. Vale lembrar que para realizar esse feito, Michelson se embasou nas ideias da física clássica, e na lei de adição de velocidades, uma vez que a física moderna não havia sido desenvolvida. O interferômetro de Michelson baseia seu funcionamento no fenômeno de interferência óptica. Um feixe de luz monocromático e coerente é direcionado a um espelho semiprateado, que permite a passagem de metade da intensidade incidente, enquanto a outra metade é refletida. O feixe inicial, agora estava dividido em dois feixes. Estes dois feixes atingiam espelhos totalmente reflexivos, e retornavam ao espelho semi-prateado, onde se combinavam e se encontravam num anteparo, formando uma imagem de interferência óptica (semelhante à figura 1). Os raios divididos percorrem sentidos diferentes, onde um raio viaja na direção de deslocamento da terra, e o outro perpendicularmente ao primeiro.

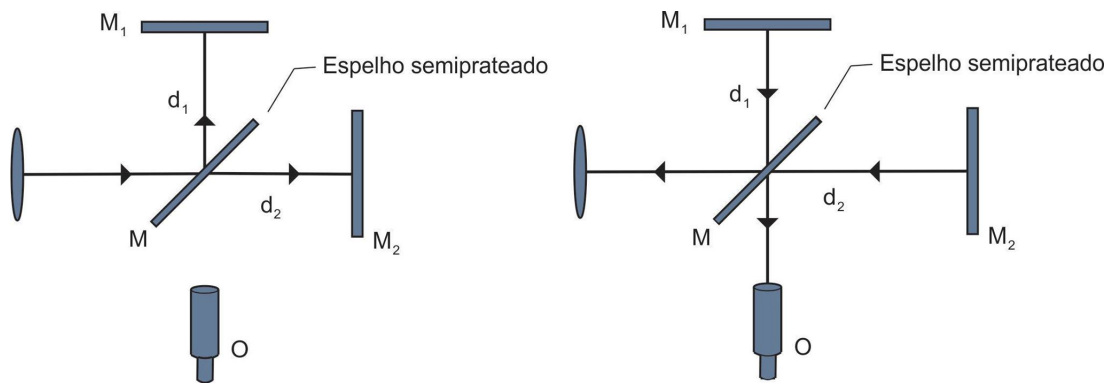


Figura 2: Esquema representativo do interferômetro. Na figura da esquerda, vemos uma representação dos feixes emitidos; na figura da direita vemos uma representação dos feixes que são refletidos.

A diferença de caminhos ópticos entre os feixes gera uma diferença de fase entre eles; uma diferença de caminho óptico de um comprimento de onda produz uma diferença de fase de 360° , que equivale a nenhuma diferença de fase e consequentemente a uma interferência construtiva. Uma diferença de caminho óptico de meio comprimento de onda produz uma diferença de fase de 180° , e os feixes interferem destrutivamente. Generalizando, uma diferença de caminho óptico Δr gera uma diferença de fase δ dada por:

$$\delta = \frac{\Delta r}{\lambda} 2\pi = \frac{\Delta r}{\lambda} 360^\circ. \quad (3.31)$$

Em que λ é o comprimento de onda do feixe de luz. Quando os dois feixes são superpostos no espelho semi-prateado, o resultado é uma figura de interferência óptica em que há regiões onde a diferença de fase é de 360° (interferência construtiva) e há regiões onde a diferença de fase é de 180° (interferência destrutiva); por isso há esse tipo de padrão de interferência do tipo franjas.

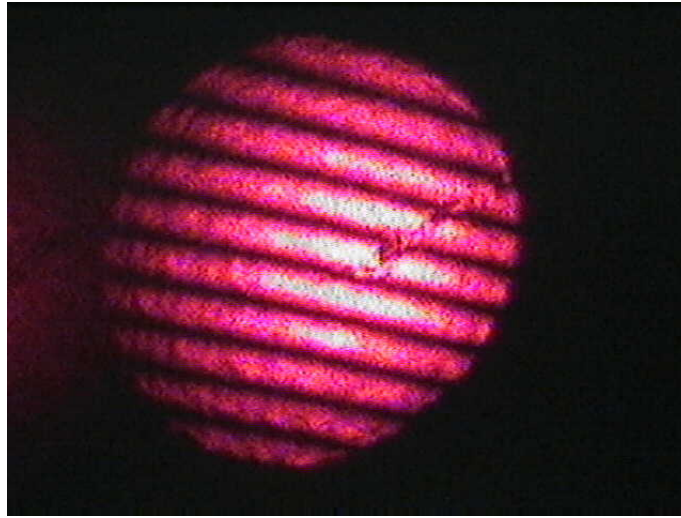


Figura 3: Padrão de interferência do tipo franjas

3.4 O Interferômetro e a relatividade

De que forma Michelson mediria a velocidade da terra em relação ao éter? Michelson teve a ideia de se utilizar da relatividade de Galileu. Para ajudar a entender a aplicação da relatividade de Galileu vamos tirar um exemplo do livro do CHESMAN (pag. 65) :

“Dois amigos decidem fazer uma aposta numa corrida de Jet-ski em um rio perene, cujo fluxo de água se movimenta com uma velocidade v . Será uma aposta diferente, pois ganhará quem percorrer, com a mesma velocidade, que será batizada de c , a mesma distância, no menor intervalo de tempo. As distâncias percorridas tem o mesmo tamanho L e são perpendiculares entre si, com relação ao sentido do fluxo da água do rio, conforme mostrado na figura abaixo. Nessa situação, um dos amigos fará uma trajetória perpendicular em relação ao sentido do fluxo da água do rio e o outro fará na direção paralela ao fluxo da água. Quem ganhará a aposta? Aquele que se movimenta na direção perpendicular ou aquele que se movimenta paralelamente ao fluxo da água?”

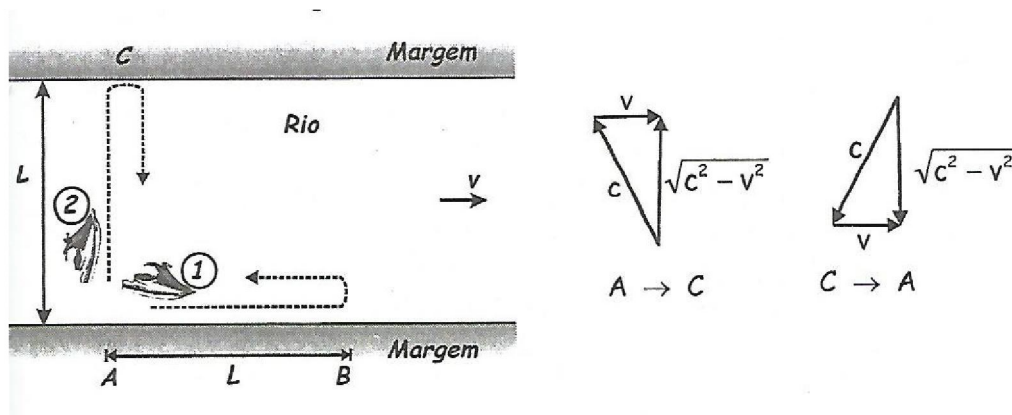


Figura 4: Distâncias percorridas pelos jet-skis; diagrama das velocidades para o jet-ski 2.

Fonte: Figura retirada do livro do CHESMAN, pag. 65

Conforme indicado na figura acima, os tempos gastos nos percursos de ida e volta foram divididos. Sejam, t_{AC} (o tempo de ida do Jet-ski 2), t_{CA} (o tempo de volta do Jet-ski 2), t_{AB} (o tempo de ida do Jet-ski 1) e t_{BA} (o tempo de volta do Jet-ski 1). Classicamente, a velocidade relativa do movimento do Jet-ski 1 em relação ao rio, é dada por $c + v$, se o movimento for no mesmo sentido do fluxo de água, e por $c - v$, se o movimento for no sentido contrário. Logo, o tempo total t_1 do Jet-ski 1, que é a soma de t_{AB} e t_{BA} , é dado por:

$$t_1 = t_{AB} + t_{BA} = \frac{L}{c + v} + \frac{L}{c - v} \Rightarrow t_1 = \frac{(c - v)L + (c + v)L}{(c + v)(c - v)} = \frac{2cL}{c^2 - v^2}, \quad (3.32)$$

$$t_1 = \frac{2cL}{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)} \Rightarrow t_1 = \frac{2L}{c} \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}. \quad (3.33)$$

Para o caso do Jet-ski 2, observe o diagrama das velocidades na figura 4. Aplicando o teorema de Pitágoras, teremos que na ida o Jet-ski 2 deve se movimentar apontando ligeiramente para a esquerda, de modo a compensar a velocidade v do fluxo da água do rio e chegar a outra margem na mesma direção do ponto de saída. Na volta, o movimento deve ser direcionado para a direita, permitindo o retorno ao ponto de saída. Desta forma, o tempo total t_2 do Jet-ski 2 será:

$$t_2 = t_{AC} + t_{CA} = \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} + \frac{L}{\sqrt{c^2 - v^2}} \Rightarrow t_2 = \frac{2L}{\sqrt{c^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}} \Rightarrow t_2 = \frac{2L}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.34)$$

Agora, dividindo-se t_2 por t_1 , obtemos:

$$t_1 = \frac{t_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Rightarrow t_1 = \gamma t_2. \quad (3.35)$$

Onde:

$$\gamma = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (3.36)$$

é denominado fator de Lorentz. Analisando a expressão para os tempos, podemos inferir algumas situações:

- $v = 0$ (velocidade do rio é nula) $\Rightarrow \gamma = 1 \Rightarrow t_1 = t_2$
- $v = \frac{1}{2}c$ (velocidade do rio é metade da velocidade dos jet-skis) $\Rightarrow \gamma = \frac{2}{\sqrt{3}} \Rightarrow t_1 > t_2$
- $v = c$ (velocidade do rio é igual a velocidade dos jet-skis) $\Rightarrow \gamma = \infty \Rightarrow t_1 \gg t_2$

Esse exemplo ilustra que, na presença de um meio material (nesse caso a água), existirá uma diferença de tempo entre dois percursos perpendiculares entre si. A partir desses resultados, Michelson preparou um experimento no qual dois feixes de luz iriam se propagar em direções perpendiculares, admitindo um referencial ligado à Terra em movimento em relação ao éter (semelhantemente ao rio perene descrito acima).

De acordo com os cálculos de Michelson, se o interferômetro (que foi montado em uma base giratória) fosse girado 90° , resultaria num deslocamento de aproximadamente 0,04 de franja, causado pela diferença de caminhos, semelhante ao exemplo citado acima. Apesar de ser um valor muito pequeno, essa variação seria detectada por um experimentador perito como Michelson.

Mas o resultado foi contra o que todos esperavam. Segundo o que o próprio Michelson percebeu, não houve deslocamentos das franjas de interferência, então a hipótese do éter estacionário parecia incorreta. Mesmo assim, Michelson repetiu o experimento, recebendo uma contribuição experimental de Edward Morley. Essa contribuição foi a de aumentar o caminho óptico (as distâncias d_1 e d_2 na figura 3) por um fator de 10 vezes, e montar o interferômetro sobre um tanque de mercúrio. O objetivo de aumentar o caminho óptico seria aumentar a variação das franjas quando o interferômetro fosse rotacionado. Com essa alteração, a variação das franjas de interferência passaria de 0,04 a 0,4 de franja. Já

o tanque de mercúrio servia para diminuir as vibrações mecânicas do sistema durante a rotação, pois essas vibrações poderiam levar a resultados incorretos.

O resultado obtido foi o mesmo da primeira realização do experimento: nenhuma variação das franjas. Apesar do que é dito, Michelson não rejeitou os resultados negativos referente ao éter de seu experimento, como afirma Martins:

O Resultado obtido, contrário à expectativa, podia ser interpretado de muitos modos diferentes. Michelson não rejeitou os resultados do experimento, evidentemente, mas adotou uma interpretação que é diferente da interpretação relativística, posterior. (MARTINS, 1998, p. 266)

A partir dos resultados negativos do experimento de Michelson, a teoria etérea começou a declinar. Mas ao contrario do que é dito, o experimento de Michelson-Morley não é capaz de estabelecer a não existência do éter. Como Martins ressalta: “(...) nem o experimento de Michelson e Morley nem qualquer outro experimento permitem estabelecer a não existência do éter” (MARTINS, 1998, p. 266).

A própria relatividade restrita não desmente o éter. O fato é que a relatividade restrita não necessita da existência do éter para explicar os fenômenos relativísticos. Assim, Michelson não descartou a existência do éter. Ele apegou-se a teoria etérea até o fim de sua vida, como destaca Fernando Lang:

Michelson, que se aferrou ao éter até o amargo fim, nunca crendo que seus experimentos o refutavam, em 1925 (Michelson morreu em 1931) acreditou ter detectado experimentalmente o vento de éter (Silveira, 2004, p. 3)

Mas podemos considerar que de certa forma, a relatividade de Einstein nasceu com o resultado negativo do experimento de Michelson-Morley, apesar de Einstein afirmar que ao longo do desenvolvimento da relatividade restrita, não tomou conhecimento dos experimentos de Michelson e Morley.

3.5 A natureza corpuscular da luz e o LASER

No ano de 1900, Planck causa uma grande revolução na física da época ao propor a hipótese quântica. Resumidamente, Planck propôs que a emissão de radiação é feita através de pacotes (quanta), com energia proporcional à frequência. Em 1905 Einstein se utiliza da hipótese quântica de Planck para explicar o efeito fotoelétrico (NUSSENZVEIG, 2011). Algum tempo após, Niels Bohr também se utiliza da hipótese de Planck, e formula

seu modelo atômico, no qual os elétrons são obrigados a manter-se em níveis fixos de energia e momento angular quantizado. Ou seja, para mudar de nível de energia, ou de órbita, o elétron deveria receber ou ceder os quanta de energia.

Em 1917, Einstein publica um artigo que trata da emissão espontânea e da emissão estimulada de radiação. Para entender esses conceitos vamos abordar o modelo atômico atual. Neste modelo, um átomo consiste de um núcleo, contendo prótons e nêutrons, e uma “nuvem de elétrons” externa ao núcleo. Para facilitar, podemos imaginar os elétrons dessa nuvem circulando em volta do núcleo em diversas órbitas. Essas órbitas são permitidas apenas em regiões específicas (órbitas discretas) de acordo com o nível de energia do elétron. Logo, temos elétrons espalhados em vários níveis de energia, e consequentemente, várias órbitas. Quando aplicamos uma certa quantidade de energia à um átomo (na forma de luz por exemplo), os elétrons nos orbitais de menor energia transportam-se para orbitais de maior energia (órbitas mais externas). Assim que um elétron se transporta para uma órbita de maior energia, ele eventualmente vai voltar ao seu estado fundamental. Mas para voltar, ele tem que se livrar da energia extra que ele possui; para isso ele vai liberar essa energia extra na forma de um fóton. Esta é a chamada emissão espontânea.

Na emissão estimulada, quando o elétron está em um estado excitado (estado de maior energia) um fóton é emitido para interagir com o elétron excitado. O resultado é que o elétron volta ao seu estado fundamental, e emite um fóton que possui as mesmas características do fóton que interagiu com o elétron inicialmente. Quando esse processo ocorre com inúmeros átomos, temos inúmeros fótons com as mesmas características sendo emitidos, formando um feixe de luz monocromático, coerente e direcionado.

A partir do princípio de emissão estimulada, no início dos anos 50 nasceu o MASER: **M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, em uma tradução livre amplificação de microondas por emissão estimulada da radiação. O MASER surgiu devido aos esforços de Charles Townes, Alexander Prokhorov e Nikolai Basov. Townes usou moléculas de amônia que eram excitadas por um agente externo; daí as moléculas de amônia entravam em vibração com uma frequência de microondas. Então, o processo de emissão estimulada gerava um feixe coerente de microondas (FIGUEIREDO, 2004).

Depois que o MASER foi demonstrado, começou a busca pelo MASER óptico: um MASER que emitisse radiação na frequência da luz visível. Em 1960, Theodore Maiman anunciou o funcionamento do primeiro MASER óptico, ao qual ele sugeriu o nome de LOSER: **L**ight **O**scillation by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (oscilação da luz por emissão estimulada de radiação). Mas “loser” significa “perdedor”, então o nome foi trocado

por LASER: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation, em uma tradução livre, amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. Então, a idéia básica do funcionamento do LASER é utilizar emissão estimulada para desencadear um grande número de fótons com a mesma frequência, fase, polarização e direção de propagação.

4 Desenvolvimento do aparato experimental

4.1 Avaliando a viabilidade da Montagem

O desenvolvimento deste experimento/equipamento envolveu várias etapas. Cada uma delas dependeu do sucesso na etapa anterior.

- Estudo do histórico do equipamento original;
- Observação do fenômeno no equipamento comercial na configuração original;
- Reprodução do fenômeno com alteração dos componentes individuais: LASER, Divisor do Feixe, Espelhos e Mesa óptica;
- Construção dos protótipos de cada componente;
- Montagem do equipamento protótipo;
- Readequação dos componentes em função da montagem final otimizando a relação custo/benefício;
- Tornar o equipamento apresentável;
- Desenvolver o novo roteiro experimental.

Cada etapa é descrita detalhadamente a seguir.

4.1.1 Estudo do histórico do equipamento original

O primeiro passo foi realizar o estudo da óptica física e o fenômeno da interferência de ondas luminosas. Em seguida as premissas da relatividade restrita e suas implicações

e finalmente a leitura minuciosa do artigo original de Michelson e Morley sobre o experimento. Depois partiu-se para o levantamento bibliográfico para se entender os aspectos históricos e científicos da época, condições técnicas que os experimentadores dispunham, elementos experimentais, aparatos disponíveis, técnicas e experimentais usadas na época. Buscando neste levantamento informações em artigos, livros técnicos, livros e revistas de divulgação científica.

Depois foi realizado um estudo teórico acerca do funcionamento do experimento, seus princípios físicos, os possíveis resultados, a interpretação de seus resultados frente à física clássica e a física moderna. Este estudo foi realizado através de livros textos de disciplinas de física moderna e óptica (HALLIDAY, 2009), (TIPLER, 2010).

4.1.2 Observação do fenômeno com equipamento na configuração original

Após os estudos, o próximo passo foi desenvolver certa “intimidade” com o experimento. Para isso, foi necessário conseguir um interferômetro pronto. Foi analisado um interferômetro comercial didático cedido temporariamente pelo Prof. Carlos Chesman DFTE-UFRN e outro interferômetro comercial também didático modelo EQ073 da empresa CIDEPE pertencente à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE-CAA). De posse do interferômetro, trabalhamos no experimento a fim de adquirir prática em seu manuseio, e aprender detalhadamente o funcionamento de todos os seus componentes.

O próximo momento foi realizar um “teste” de viabilidade: era preciso saber se era possível e viável montar um interferômetro utilizando materiais acessíveis. A solução seria substituir os componentes (LASER, divisor de feixes, espelhos) do interferômetro didático da universidade, por componentes fabricados a partir de materiais acessíveis e de baixo custo.

4.1.3 Reprodução do fenômeno: testando novos componentes

A Substituição do LASER

O equipamento comercial utiliza um LASER a gás de He-Ne (Hélio-Neônio) emitindo na faixa do vermelho em comprimento de onda de (632 ± 5) nm com 2 mW de potência. Foi feita a substituição do LASER de gás do interferômetro, por um diodo LASER encontrado no comércio popular, que também emite na faixa do vermelho com comprimento de onda nominal de 650 nm e potência inferior a 5 mW. Observou-se que as figuras de interferência

formadas pelo LASER a gás e pelo diodo LASER eram muito semelhantes. O resultado foi estimulante, já que o tipo do LASER usado parece não comprometer o experimento. É conhecido, no entanto, que a estabilidade do espectro de emissão do LASER a gás é muito superior ao LASER comprado no comércio popular.

A Substituição do divisor do feixe

O divisor de feixes que pertence ao interferômetro comercial é constituído por dois prismas retangulares de vidro, unidos de tal maneira que formem um cubo. Na junção entre os dois prismas há o espelho semitransparente, como pode ser observado na figura a seguir:



Figura 5: Divisor de feixes de um interferômetro comercial.

Nesta configuração, o espelho está diagonalmente inserido no cubo, de modo que basta colocar a face do cubo perpendicular ao sentido de propagação do LASER para garantir que o espelho divisor esteja formando um ângulo de 45° com o feixe do LASER. Para substituir o divisor de feixes, algumas opções foram testadas; inicialmente testamos uma lâmina usada em microscopia:

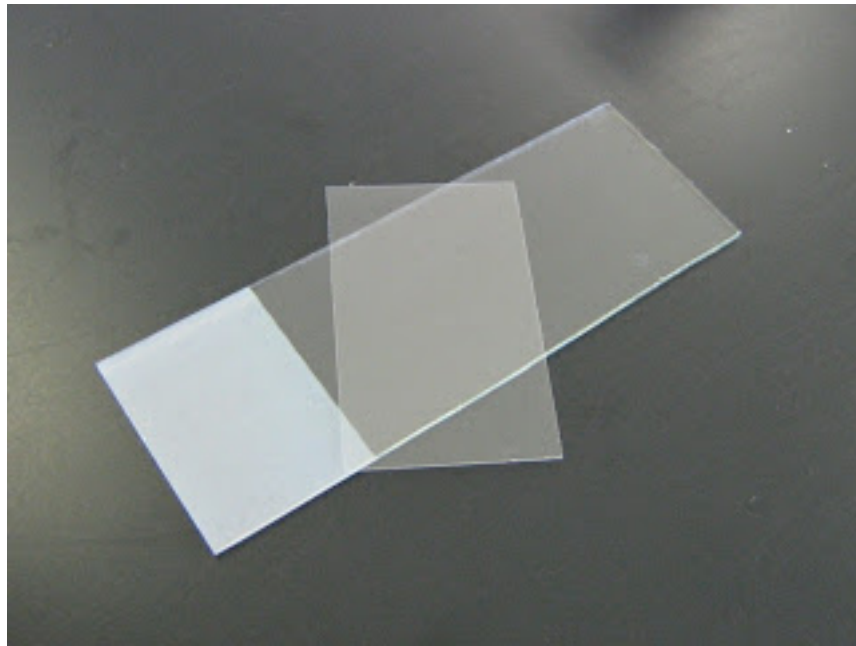


Figura 6: Lâmina para microscopia.

A divisão de feixes não saiu como esperado, pois a lâmina cria um padrão de interferência antes de combinar os feixes, e esta opção foi trocada por uma lamínula (uma espécie de lâmina mais fina, conforme a figura 7).

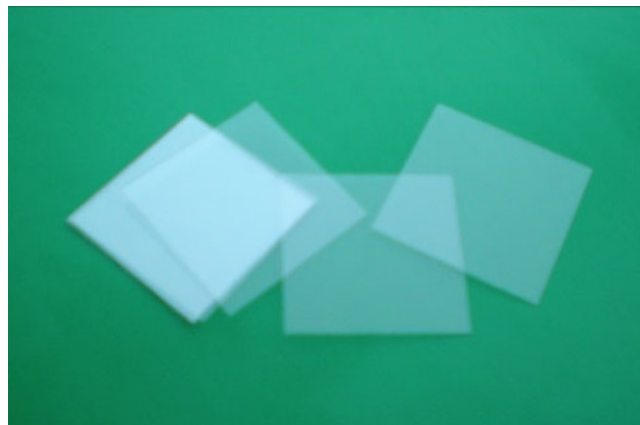


Figura 7: Lamínula para microscopia.

A divisão de feixes proporcionada pela lamínula causou um padrão de interferência semelhante ao padrão causado pela lamina. Após mais alguns testes, a lamínula foi substituída por uma peça quadrada de vidro de 9 mm de espessura (ver figura 8), por apresentar uma divisão de feixes sem adicionar um padrão "extra" de interferência.



Figura 8: Peça de vidro de 9 mm.

A Substituição dos espelhos

A primeira ideia que se tem é a de utilizar espelhos comuns. No entanto, em espelhos comuns a superfície refletora é coberta por camadas de vidro; daí, quando a luz incide, parte é refletida pela camada de vidro, e a outra parte é refratada e atinge a superfície refletora; após ser refletida, os dois feixes de luz se encontram e se interferem, prejudicando o andamento do experimento. Por isso há a necessidade de uso de espelhos que tenham a face refletora exposta, conhecidos como espelhos de primeira face, sem camadas de vidro fazendo cobertura. A partir disso, obtivemos espelhos de primeira face.

A Substituição da mesa

O interferômetro é um aparato experimental de alta sensibilidade, de modo que pequenas ações (como andar próximo ao experimento) causam interferências indesejadas na execução do fenômeno. Por isso, deve-se montar uma mesa-óptica para proporcionar estabilidade, evitando assim as interferências externas. Dessa forma, se faz necessário que o equipamento esteja fixado a uma base que possua alta quantidade de inércia. Essa base é comumente conhecida como mesa-óptica. O aparato comercial possui uma base confeccionada em madeira. Para substituí-la, foi construída uma mesa com massa de 10 kg, de cimento, que ficou como apresentado na figura 9:

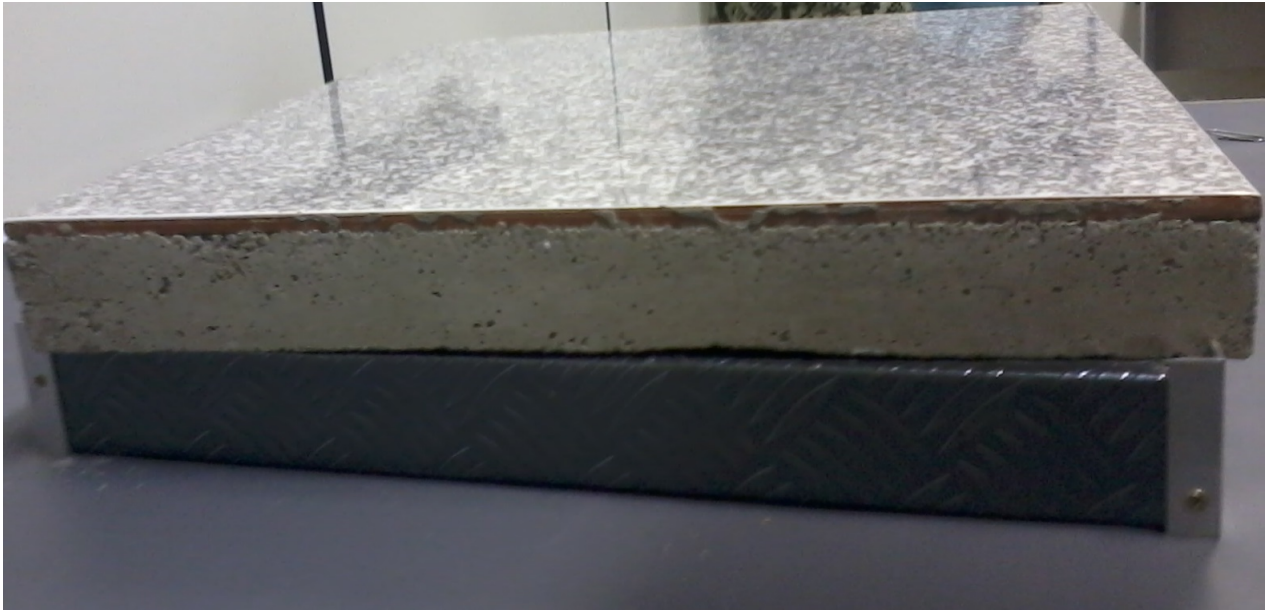


Figura 9: Mesa-óptica.

4.2 A montagem

Considerando-se o refinamento do experimento original, buscou-se construir um equipamento alternativo de menor custo e com a maior sofisticação possível. Para melhor explicar a montagem e os materiais utilizados, serão apresentadas seções com os respectivos componentes.

4.2.1 O Divisor do Feixe

O divisor de feixes é o componente responsável por dividir o feixe do LASER em outros dois feixes perpendiculares, de mesma intensidade. Conseguir um divisor ideal é um tanto quanto difícil, e até inviável. Dessa maneira, a solução encontrada foi substituí-lo por uma lâmina de microscopia. Mas a lâmina ao dividir o feixe, causava um efeito de interferência, prejudicando o andamento do experimento. Para entender a interferência causada pela lâmina, observe a figura 10. Um feixe de luz é incidido na interface superior ar-lâmina; uma fração desse feixe é refletida, e outra fração é refratada conforme a lei de snell. O feixe que foi refratado, ao alcançar a interface inferior da lamina é novamente refletido e refratado. Esse segundo processo de reflexão vai originar um feixe que irá propagar-se paralelamente ao feixe gerado na primeira reflexão:

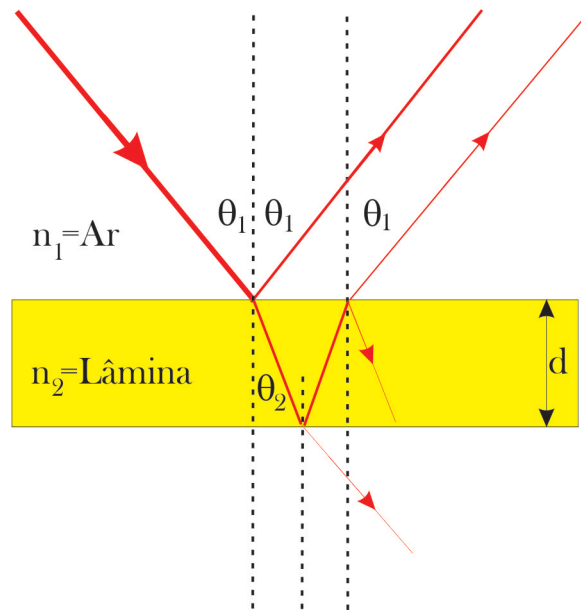


Figura 10: Divisão dos feixes (figura fora de escala).

A medida que a espessura do divisor de feixes diminui, o mesmo ocorre com a distância entre os feixes refletidos, conforme a figura 11:

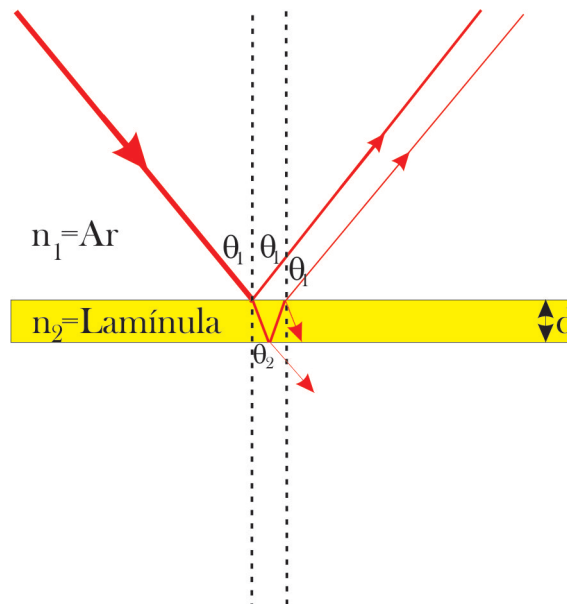


Figura 11: Divisão dos feixes com um divisor de menor espessura (figura fora de escala).

Quanto menor a espessura do divisor de feixes, maior será a interferência entre os dois feixes refletidos. Assim, o divisor de feixes utilizado não poderia ser de espessura muito fina; logo o divisor utilizado deve ter uma determinada espessura (idealmente um pouco mais espessa que o spot do LASER), para que não haja interferência.

4.2.2 Os Suportes

Os suportes fixarão a fonte de luz (no nosso caso o diodo LASER), os espelhos (totalmente refletor e o semi-refletor) e a lente objetiva. Eles foram montados utilizando uma cantoneira de alumínio conforme figura 12:



Figura 12: Cantoneira usada para montagem dos suportes.

Foi cortado um segmento da cantoneira com 14 cm, e dividido em sua junção. Dessa maneira, obtém-se duas chapas de alumínio de espessura 3 mm, cada uma com a medida mencionada, como é mostrado na figura 13:

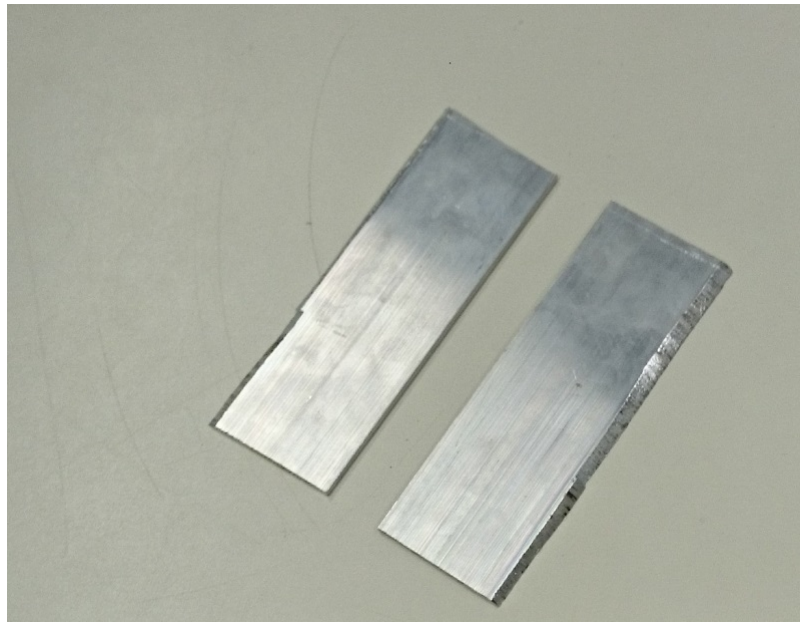


Figura 13: Cantoneira cortada.

A seguir a chapa foi dobrada em um ângulo de 90° com base de aproximadamente 4 cm e comprimento de aproximadamente 10 cm. O próximo passo foi cortar um cano com diâmetro de 75 mm em anéis com 2 cm de comprimento. Então, as chapas foram inseridas no interior desses anéis. Também foram inseridos ímãs de neodímio e os anéis foram preenchidos com massa epóxi, conforme figura 14:



Figura 14: Ímã de Neodímio retirado de um disco rígido de computador.

A próxima etapa é inserir furos na chapa de alumínio para fixação de parafusos, que serão responsáveis pela regulagem dos suportes, para que haja o alinhamento dos feixes de luz. Os furos devem formar um triângulo, afinal, são necessários no mínimo três pontos para a formação de um plano, pois esse plano será o plano de deslocamento dos espelhos; também deverá ser inserido um furo (de diâmetro menor) no centro do triângulo, para fixar a mola de regulagem. Agora, são inseridas roscas nos furos, para fixação dos parafusos.

Para inserir as roscas, basta fixar porcas nos furos.

4.2.3 Os Espelhos

Os espelhos serão fixados em discos metálicos, que por sua vez serão fixados aos suportes por meio da mola. Esses discos possuem um formato que permite uma espécie de embalagem (do tipo tampa) protetora; esse tipo de peça se faz necessário para que haja um sistema de proteção ao espelho quando este não estiver sendo utilizado, visto que ele não possui camada de vidro para proteger a superfície refletora.

4.2.4 Os Goniômetros

Os sistemas de goniômetros são os responsáveis pela variação angular polar e azimutal do espelho fixado no suporte. Em sistemas convencionais, o parafuso mantém contato direto com o suporte onde o espelho está fixado. Dependendo da forma como esse sistema é confeccionado, ao executar a operação de regulação dos feixes, o parafuso algumas vezes “emperra”, ou seja, a regulação é executada mas o parafuso não muda a angulação do suporte; ao continuar com a regulação, o parafuso dá então um salto, prejudicando o alinhamento dos feixes. Visando eliminar esse aspecto prejudicial do sistema e proporcionar um mecanismo de ajuste mais sensível, o contato entre o parafuso e o suporte do espelho é intermediado por uma esfera metálica, conforme a figura 15:

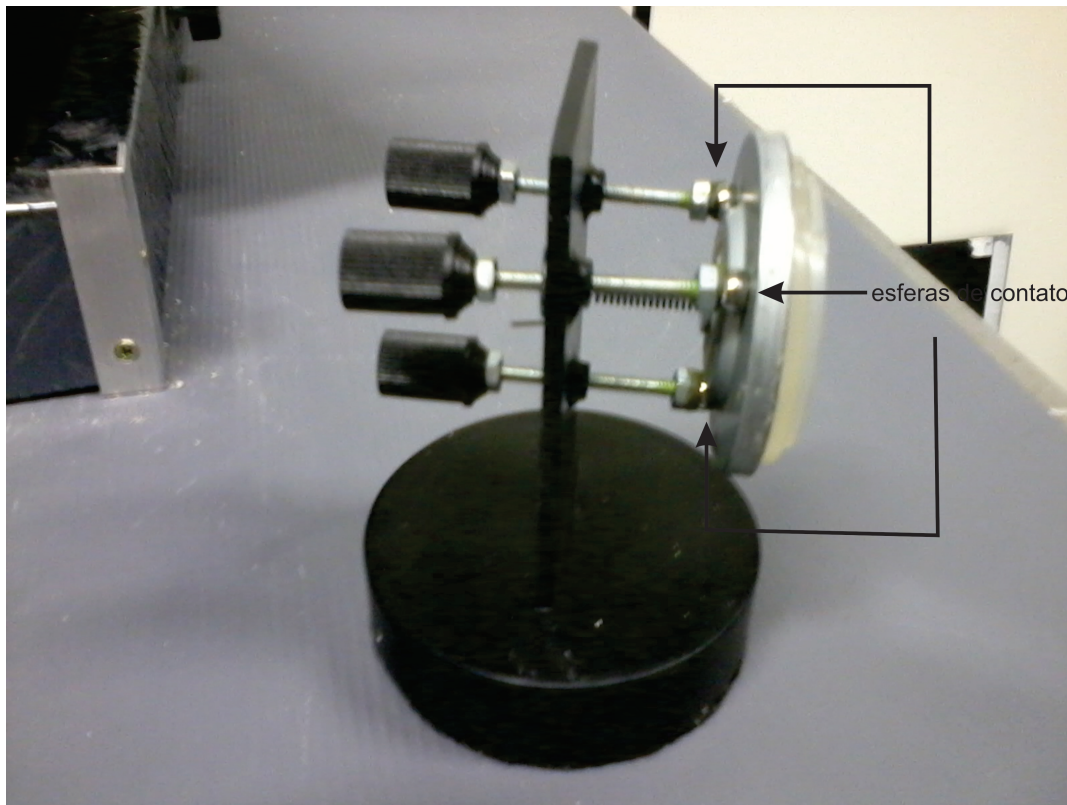


Figura 15: Goniômetro.

4.2.5 A Mesa-óptica

Foi fixado na superfície da mesa-óptica uma chapa de ferro com área igual a área da mesa. Essa chapa faz-se necessária para que haja a fixação dos suportes à mesa (fixação entre os ímãs e a superfície ferromagnética).

Como o aparato que propomos tem a finalidade de se aproximar o máximo possível do aparato original montado por Michelson, ainda falta desenvolver o sistema de suspensão da mesa, que tem a finalidade de atenuar as vibrações do ambiente. Michelson e Morley utilizaram um tanque de mercúrio no qual a mesa-óptica ficava em um estado de suspensão. Para contornar esse sistema, foi utilizado um aparato de suspensão pneumática, montada a partir de uma câmara de ar e dutos pneumáticos. A câmara estará sobre um sistema de rolamentos que permite que a mesa óptica seja rotacionada, afinal de contas, a rotação do sistema era o que determinaria a medição proposta por Michelson. A mesa com o sistema de suspensão é exibida na figura 16:



Figura 16: Montagem final do aparato.

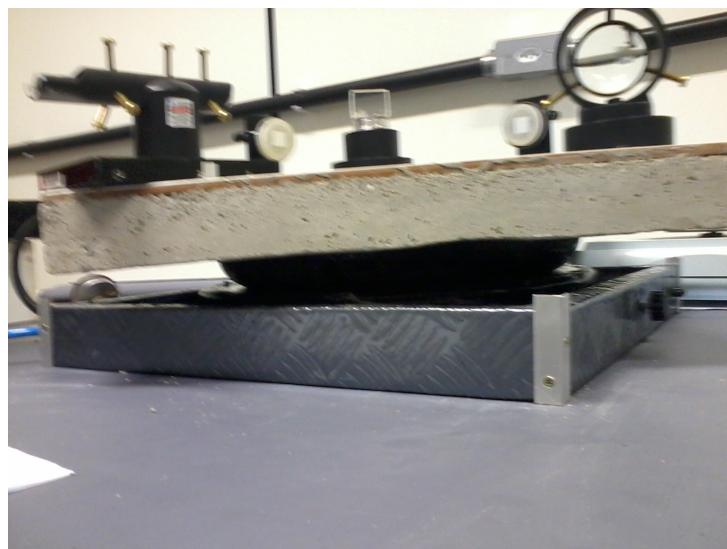


Figura 17: Montagem final do aparato com sistema de suspensão pneumática em funcionamento.

5 Resultados

Em comparação com outros interferômetros, vale ressaltar que as características diferenciais do nosso interferômetro foram: o divisor de feixes, construído a partir de uma peça quadrada de vidro comum, com 9 mm de espessura; fixação dos componentes através de ímãs de neodímio, resultando em uma fixação mais eficiente que em outros interferômetros, e sistema de suspensão pneumática. A vantagem desse sistema de suspensão é que aliado a alta quantidade de inércia da mesa óptica, torna o interferômetro mais estável em relação às perturbações externas; nosso divisor de feixes proporcionou uma figura de interferência óptica praticamente no mesmo nível que a figura produzida pelo divisor do interferômetro comercial e nosso interferômetro possui mais estabilidade. Assim, ao executar o experimento com o interferômetro comercial, ações como caminhar e até falar próximo ao experimento causavam uma certa oscilação nas franjas de interferência, já com o aparato que construímos, devido ao sistema de suspensão e a alta quantidade de massa da mesa óptica, houve resistência a grande parte das vibrações externas.

Para quantificar a capacidade de absorção do sistema de suspensão, foi realizado um teste se utilizando de um aplicativo gratuito para smartphones, chamado *Vibration Monitoring*; este aplicativo faz uso do acelerômetro do smartphone para detectar vibrações (variação da aceleração) nos eixos x, y e z. Primeiramente, um oscilador foi inserido na bancada de trabalho, e o smartphone foi colocado sobre a bancada, afim de monitorar as vibrações sobre a bancada. Após determinado tempo, o smartphone foi colocado sobre a mesa óptica do interferômetro. O gráfico gerado através desse monitoramento (analisando o eixo x) é exibido na figura 18:

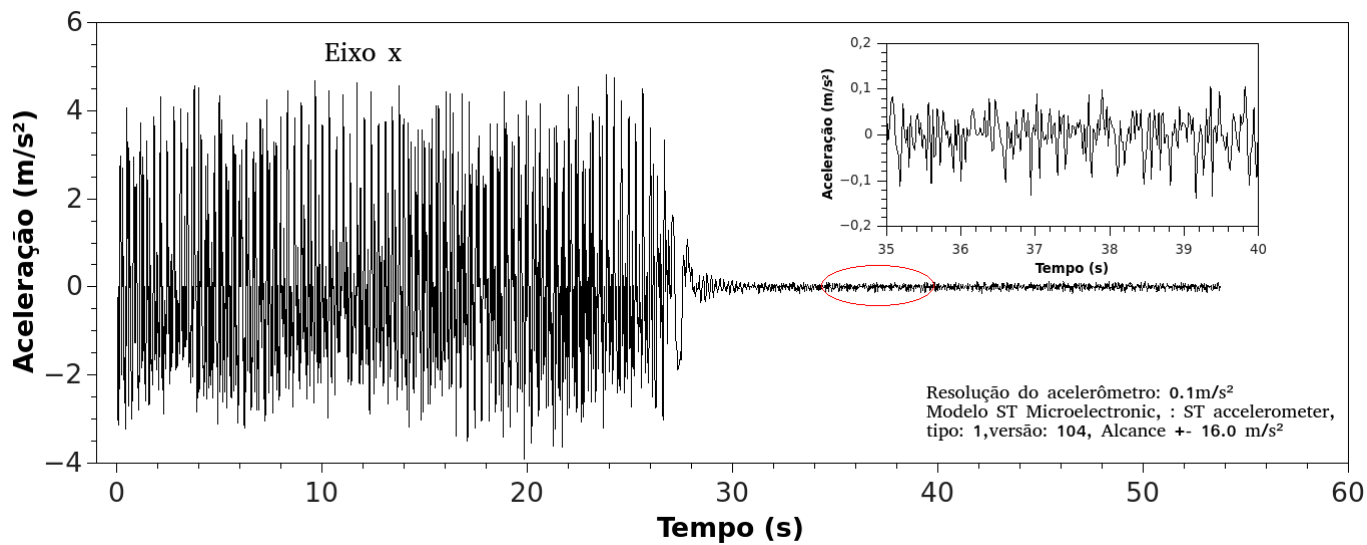


Figura 18: Análise da vibração da bancada e da mesa óptica ao longo do eixo x

Note que a vibração da bancada atinge amplitude de aproximadamente $4m/s^2$, enquanto que quando o smartphone é posto sobre a mesa óptica do interferômetro, a amplitude de vibração é atenuada drasticamente, passando a aproximadamente $0,1m/s^2$; apesar que esse valor é incerto devido a precisão do acelerômetro do smartphone, que é de $0,1m/s^2$. Mesmo levando em consideração essa incerteza, pode-se constatar a eficiência do sistema de suspensão da mesa óptica.

Agora, vamos comparar as figuras de interferência óptica dos dois interferômetros. Observe a figura 19:

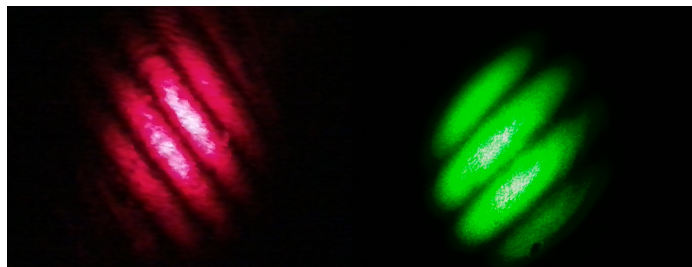


Figura 19: À esquerda, temos a figura de interferência óptica formada pelo interferômetro didático; à direita, temos a figura de interferência óptica formada pelo interferômetro de baixo custo.

Apesar das figuras serem formadas por LASERs de comprimentos de onda diferentes, percebe-se que a resolução das franjas são semelhantes, sendo que a figura de interferência do LASER verde está com o alinhamento dos feixes mais centralizado que o LASER

vermelho, por isso suas franjas são mais espessas. É perceptível que a qualidade da figura de interferência do aparato de baixo custo é comparável com o aparato comercial, o que evidencia que o trabalho aqui proposto é viável tanto no ponto de vista econômico, uma vez que o custo para construí-lo foi de cerca de 1% do valor do aparato comercial, quanto no ponto de vista da qualidade do experimento.

6 Considerações finais

O interferômetro de Michelson foi um importante aparato experimental, tanto que sua confecção ajudou a proporcionar que Michelson fosse o primeiro norte-americano agraciado com um prêmio Nobel. Várias são as aplicações didáticas que podemos extrair de um interferômetro de Michelson: verificação das leis de Fresnel-Arago, visualização dos vários tipos de franjas de interferência óptica, estudo da coerência da luz de algumas fontes, determinação do comprimento de onda da luz do laser, determinação do índice de refração de um material, estudo da variação do índice de refração de um gás com a pressão, entre outras. Conseguimos proporcionar a montagem de um experimento sofisticado, mas ao mesmo tempo com a utilização de materiais simples e de fácil obtenção. O custo para a produção desse aparato aproxima-se do valor de 200 reais, enquanto que o aparato didático comercial se aproxima de 20 mil reais.

No que se refere à produção das franjas de interferência, nosso aparato possui o mesmo nível de resolução que o interferômetro comercial; assim sendo, o roteiro proposto por esse trabalho torna-se uma alternativa interessante no que diz respeito ao ensino de física, onde pode-se trabalhar conceitos de óptica e física moderna, levando em consideração os Parâmetros Curriculares Nacionais. Ou seja, disponibilizamos um objeto educacional que pode ser utilizado em diferentes contextos, desde aplicações simples, para ilustrar leis e fenômenos físicos, até aplicações mais sofisticadas, para realizar medições complexas, custando aproximadamente 1% do valor de um aparato didático comercial, mas que praticamente demonstra os mesmos resultados.

APÊNDICE A – Franjas de Interferência

A interferência é o fenômeno que superpomos ondas numa mesma região do espaço. Como resultado desta superposição de campos, ocorrem variações espaciais na intensidade resultante. Estas variações de intensidade são chamadas de franjas de interferência. Embora a interferência seja um fenômeno inerente ao caráter ondulatório da luz, no dia a dia não é muito comum a observação de interferência. Por exemplo quando iluminamos uma sala com diversas lâmpadas não observamos franjas de interferência. Isto acontece porque as fontes de iluminação que utilizamos rotineiramente são incoerentes.

Superposição de ondas

Quando duas ondas eletromagnéticas se superpõem em uma mesma região do espaço, os campos elétricos e magnéticos resultantes são a soma vetorial dos campos individuais devido a cada uma das ondas isoladamente (devido ao princípio da superposição), da mesma forma que os campos devido a presença de cargas elétricas se somam (NUSSENZ-VEIG 2010):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2,$$

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{01} e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r}_1 - \omega_1 t + \phi_1)},$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_{02} e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r}_2 - \omega_2 t + \phi_2)}.$$

A irradiância da onda resultante, supondo duas ondas linearmente polarizadas:

$$I = |\langle \vec{S} \rangle| = \frac{1}{2} \frac{n|E|^2}{Z_0} = c \vec{E} \cdot \vec{E}^* = c(\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1^* + \vec{E}_2^*).$$

Se $\omega_1 = \omega_2$, as ondas de mesma frequência $\longrightarrow |\vec{K}_1| = |\vec{K}_2|$,

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}^* e^{i(\vec{K}_1 \cdot \vec{r} - \vec{K}_2 \cdot \vec{r} + \phi_1 - \phi_2)},$$

$$\vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* = \vec{E}_{02} \cdot \vec{E}_{01}^* e^{i(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \vec{K}_1 \cdot \vec{r} + \phi_2 - \phi_1)}.$$

A parte temporal $i\omega t$ e $-i\omega t$ se cancelam se as ondas têm a mesma frequência.

Se $\phi_2 - \phi_1 = cte$, os produtos cruzados podem ser escritos como $\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}^* (e^{i\Delta} + e^{-i\Delta}) \rightarrow \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}^* (2\cos\Delta)$,

$$\vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2^* + \vec{E}_2 \cdot \vec{E}_1^* = \vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}^* 2\cos(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \vec{K}_1 \cdot \vec{r} + \phi_2 - \phi_1),$$

$$I = I_1 + I_2 + 2c\vec{E}_{01} \cdot \vec{E}_{02}^* \cos(\vec{K}_2 \cdot \vec{r} - \vec{K}_1 \cdot \vec{r} + \phi_2 - \phi_1).$$

Podemos interpretar a Equação acima como uma variação periódica de intensidade em função da diferença de fase entre as ondas (franjas de interferência). O termo oscilatório que carrega esta dependência com a fase é chamado de termo de interferência, e ele varia de -1 (interferência destrutiva) a 1 (interferência construtiva). Podemos definir a visibilidade das franjas de interferência como:

$$\vartheta = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} = \frac{4\sqrt{I_1 I_2} \cos\alpha}{2(I_1 + I_2)}.$$

A visibilidade é máxima quando as ondas são linearmente polarizadas na mesma direção e quando suas irradianças são iguais $I_1 = I_2 = I_0$. Na prática para que tenhamos ondas coerentes (sincronismo), e de mesmo comprimento de onda, precisamos utilizar luz da mesma fonte por isso geralmente é utilizado um interferômetro, para dividir a frente de onda e produzir franjas de interferência.

APÊNDICE B – Tabela de materiais utilizados

Materiais utilizados	Onde encontrar	Valor do material (em reais)
Diodo LASER vermelho	Comércio popular (camelôs) e lojas de artigos para presentes	3,00
Diodo LASER verde	Lojas de artigos eletrônicos	40,00
Peça de vidro com 9mm	Estabelecimentos que fabricam espelhos	-
Cimento	Lojas de materiais de construção	10
Chapa quadrada de ferro	Lojas de ferragens	30
Parafusos (incluindo porcas e arruelas)	Lojas de materiais de construção	5
Massa Epóxi	Lojas de materiais de construção	20
Fita de fixação dupla face	Lojas de materiais de construção	20
Cantoneira de alumínio	Lojas de ferragens	20
Câmara de ar	Lojas de materiais de construção	10
Peça que proporciona a rotação da mesa	Lojas de materiais de construção	30
Lupa	Livrarias	5
Valor total gasto	-	193

Referências

ARAÚJO, Mauro Sérgio Teixeira de; ABIB, Maria Lúcia Vital dos Santos. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 25, n. 2, p. 176-194, jun/2003.

ARRUDA, S. M.; FILHO, D. O. Toginho. Laboratório Caseiro de Física Moderna. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v. 8, n. 3, dez/1991.

Banco Internacional de Objetos Educacionais. Disponível em:
<<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/>>. Acesso em fevereiro de 2013.

BARROS, A.; MONTE, E. M.; ARAÚJO, I. G.; OLIVEIRA, J. C. T.; VIEIRA, Sumaia. Sobre a contração de Lorentz-Fitzgerald. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 4, p. 621 - 623, 2005.

CHESMAN, Carlos; ANDRE, Carlos; MACEDO, Augusto. Física Moderna: Experimental e aplicada. 2. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004.

FIGUEIREDO, Michele. Desenvolvimento e caracterização de um sistema LASER de cristal líquido colestérico acoplado à fibra óptica. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2004. 140 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

FOLMER, Vanderlei; BARBOSA, Nilda B. de Vargas; SOARES, Félix A.; ROCHA, João B. T. Experimental activities based on ill-structured problems improve Brazilian school students understanding of the nature of scientific knowledge. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, v.8, n. 1, p. 232-254 , 2009.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert. Fundamentos de Física volume 4: Óptica e Física Moderna. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LÉVY-LEBLOND, J.-M. O pensar e a prática da ciência: antinomias da razão. Trad. de M. L. Panzoldo. Bauru: Edusc, 2004.

LOZADA, C. O.; Alternativas de Modelagem Matemática Aplicada ao Contexto do Ensino de Física: A Relevância do Trabalho Interdisciplinar entre Matemática e Física. In: IX Encontro Nacional de Educação Matemática, 2007, Belo Horizonte. Anais do ENEM 2007. Belo Horizonte: ENEM - UNI-BH 2007.

MARTINS, Roberto de Andrade. Como distorcer a Física: considerações sobre um exemplo de divulgação científica 2 - Física Moderna. Caderno Catarinense de Ensino de Física v. 15, n. 3, p. 265-300, 1998.

MAXWELL, J. Clerk. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. Philosophical Transactions - The Royal Society of London, p. 459-512, 1865. Disponível em: <<http://rstl.royalsocietypublishing.org/subscriptions>>. Acesso em fevereiro de 2014.

MENEGOTTO, José Carlos; FILHO, João Bernardes da Rocha. Atitudes de estudantes do ensino médio em relação à disciplina de Física. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, v. 7, n. 2, p. 298-312, 2008.

MICHELSON, Albert A.; MORLEY, Edward W. On the Relative Motion of the earth and the Luminiferous Ether. The American Journal of Science v. 34, n. 203, p. 333-345, 1887.

MOREIRA, Kizzy Freitas; CASTILHO, Weimar Silva. Atividade Experimental Simples Auxiliando no Ensino de Física: “Pêndulo de Ondas”. II Jornada de Iniciação Científica e Extensão do IFTO (JICE) 2011.

NUSSENZVEIG, Moysés. Curso de Física Básica IV: Ótica, Relatividade, Física Quântica. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2011.

OLIVEIRA, Ivan S. Física Moderna para iniciados, interessados e aficionados. Livraria da Física, vol. 1, 2005.

Orientações Teórico - Metodológicas - Ensino Médio (Física). Disponível em: <http://www.educacao.pe.gov.br/upload/galeria/1037/OrientacoesTM_FisicaEM.pdf>. Acesso em fevereiro de 2013.

OSTERMANN, Fernanda; MOREIRA, Marco Antonio. Uma Revisão Bibliográfica Sobre a Área de Pesquisa “Física Moderna E Contemporânea no Ensino Médio” . Investigações em Ensino de Ciências, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.

Parâmetros Curriculares Nacionais - Ensino Médio. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em fevereiro de 2013.

PEREIRA, Alexsandro P.; OSTERMANN, Fernanda. Sobre o Ensino de Física Moderna e Contemporânea: Uma Revisão da Produção Acadêmica Recente. Investigações em Ensino de Ciências, v. 14, n. 3, p. 393-420, 2009.

PEREIRA, Denis Rafael de Oliveira; AGUIAR, Oderli. Ensino de Física no Nível Médio: Tópicos de Física Moderna e Experimentação. Revista Ponto de Vista, v. 3, p. 65-81, 2001.

ROSA, Cleci Werner da; ROSA, Álvaro Becker da. Ensino de Física: objetivos e imposições no ensino médio. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, v. 4, n.1, 18 p., 2005.

SANTOS, C. do S. F. dos. Avaliação de Materiais Virtuais Interativos Para o Ensino de Matemática na Educação Básica. Revista de Ensino de Ciências e Matemática (REnCiMa), v. 2, n. 1, p. 81-95, jan/jun 2011.

SCHULZ, Peter A. Duas nuvens ainda fazem sombra na reputação de Lorde Kelvin. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 29, n. 4, p. 509-512, 2007.

SILVA, E. L. da; CAFÉ, L.; CATAPAN, A. H. Os objetos educacionais, os metadados e os repositórios na sociedade da informação. *Revista Ciência da Informação (Ci. Inf.)*, Brasília, DF, v. 39, n. 3, p.93-104, set/dez, 2010.

SILVEIRA, Fernando Lang. Os resultados negativos dos experimentos de Michelson-Morley refutaram a teoria do éter? A teoria da relatividade restrita se originou dos experimentos de Michelson-Morley? *Spin Eletrônico*, v. 406, p. 1-5, 2004.

TAROUCO, L. M. R.; FABRE M.-C. J. M.; TAMUSIUNAS, F. R. Reusabilidade de objetos educacionais. *Novas Tecnologias na Educação*, v. 1, n. 1, p. 1-11, fev/2003.

TIPLER, Paul; MOSCA, Gene. Física para cientistas e engenheiros volume 2: Eletricidade e Magnetismo, Óptica. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

TIPLER, Paul; LLEWELLYN, Ralph. Física Moderna. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

WOLFF, Jeferson Fernando de Souza; MORS, Paulo Machado. Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein. p. 21-22. In: Textos de apoio ao professor de física - Programa de Pós Graduação do Ensino de Física (Instituto de Física UFRGS). Editores Marco Antonio Moreira, Eliane Angela Veit. v. 16, n. 5, 68 p., 2005.