



Licenciatura em Física
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro

PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DE FINAL DE CURSO

DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO – COMO OCORRE?
Ensino a partir de um histórico da Teoria Ondulatória da Luz.

Jones da Costa Pinto Junior

Orientador

João José Fernandes de Sousa (IF – UFRJ)

Banca

João José F. Sousa (Presidente)

Penha Maria Cardozo Dias

Ricardo Borges Barthem

Susana de Souza Barros

Agosto de 2010

08/2010



Aos meus pais – que me educaram para ser um
homem íntegro e temente a Deus.

E à minha esposa, meu amor, que me encoraja
e ajuda a seguir pelo caminho que meus pais
indicaram.

Agradeço a Deus pela Vida, e por ter escrito as leis da natureza de maneira que pudéssemos compreendê-las e as utilizar em nosso proveito.

Agradeço também a todos os que, de alguma maneira, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

“Uma acumulação de fatos não faz uma ciência, tal como um conjunto de pedras não faz uma casa”.

Poincaré , Jules

Resumo

Este trabalho sugere a introdução de tópicos de História e Filosofia da Ciência no ensino de Física para o Nível Médio. Tal motivação surgiu devido à percepção do autor sobre o desconhecimento e preconceitos existentes em relação aos modelos científicos existentes antes dos atuais. Textos oficiais sobre educação são citados, como os PCN's (Brasil), os relatórios Project 2061 e The Liberal Art of Science (EUA), entre outros, onde é sugerida essa necessidade. Foi escolhido um episódio da história da Física – a evolução da teoria ondulatória da luz entre os séculos XVII e XIX – para fazer um plano de aula onde não se deseja exatamente apresentar aos alunos um novo tópico de Física, mas enfraquecer algumas visões distorcidas sobre seu desenvolvimento (e das Ciências em geral), como a que mostra o conhecimento científico como acabado, ou como cópia da realidade. Com tal plano de aula, deseja-se que os alunos compreendam as Ciências, e entre elas a Física, como parte do desenvolvimento cultural da humanidade, eternamente inacabado e sempre sendo aperfeiçoado, e que tal aperfeiçoamento é fruto da contribuição de diversas pessoas num processo que, não raro, é permeado por verdadeiras disputas. O experimento de Young é mostrado na aula, montado de maneira diferente da mostrada hoje na maioria dos livros didáticos.

Sumário

1 Prólogo.....	7
2 Introdução.....	9
3 Justificativa para a utilização de história e filosofia da ciência na sala de aula.....	12
4 A evolução do conceito de natureza ondulatória da Luz.....	18
4.1 Introdução.....	18
4.2 Cenário em que surgiu o Tratado da Luz.....	18
4.3 O Tratado da Luz.....	20
4.4 A teoria ondulatória a partir do século XIX.....	26
5 Proposta para o Nível Médio.....	33
5.1 Apresentação.....	33
5.2 Plano de aula.....	34
5.2.1 Objetivos.....	34
5.2.2 Preparação.....	34
5.2.3 Durante a aula.....	36
5.2.4 O experimento.....	37
5.2.5 Montagem.....	39
5.2.6 A coerência.....	42
6 Conclusão.....	46
REFERÊNCIAS.....	47
Apêndice 1 Teoria Ondulatória da Luz – Descrição matemática atual.....	49

1 Prólogo

A motivação para escrever este trabalho surgiu durante as aulas de “Didática Especial da Física” (7º período de Licenciatura em Física-UFRJ). O professor da disciplina propôs como tarefa, em grupos de até 3 pessoas, a elaboração de aulas que pudessem ser aplicadas ao Nível Médio. Tais aulas deveriam ser apresentadas à nossa classe, que se comportaria como se não conhecesse o tema, e em seguida uma discussão sobre a aula apresentada se iniciaria. Vários temas foram sorteados entre os grupos que se formaram, e as apresentações das aulas se iniciaria algumas semanas depois.

Uma parte do programa oficial do Nível Médio pôde ser apresentada dessa forma. Não é o escopo deste texto tratar da análise de cada aula apresentada pela turma, mas fazer um comentário geral sobre como a turma se comportou na apresentação desse trabalho (cabe nesse momento ressaltar que uma grande parte daquela turma já possuía experiência profissional em escolas de Nível Médio, e alguns, em escolas de nível fundamental também – uns poucos, nos quais o autor se inclui, não possuíam experiência alguma, a não ser o estágio supervisionado). Os temas eram tratados como se fossem conhecimentos que já houvessem surgido daquela maneira, isto é, não havia preocupação alguma em mostrar o contexto histórico / evolução do tópico (às vezes nem mesmo eram mostradas aplicações que poderiam motivar os alunos a pesquisar um pouco mais). Além disso, havia um grande preconceito em relação aos modelos científicos que existiram antes dos atuais. Eram citados (e taxados) como se fossem “mitos sem sentido”. Tratou-se a ideia aristotélica de que a Terra era o centro do universo dessa forma, ou seja, ignorou-se o fato de que essa ideia, na época, era um bom modelo, que explicava bem o funcionamento do mundo que seus contemporâneos percebiam, e que satisfazia suas necessidades. Baseando-se nesse raciocínio, alguém, inadvertidamente, poderia considerar a-científica a ideia de Copérnico (já que se sabe que o Sol não é o centro do Universo), valendo o mesmo raciocínio para quaisquer outros modelos anteriores aos utilizados hoje (e imaginando que no futuro alguns dos modelos científicos aceitos hoje sejam considerados ineficazes, e substituídos por outros melhores; a ciência atual – se utilizado aquele raciocínio – poderia ser taxada de “mito sem sentido”). Outro fato intrigante foi o seguinte: quando alguma “história” era relatada, ela invariavelmente era analisada a partir de pontos de vista atuais (não se pode analisar o pensamento de um homem medieval partindo do censo comum do século XXI), ou pior, os fatos históricos eram poluídos pelas crenças de quem os expunha (foi o caso de uma apresentação onde se afirmava que Johanes Kepler era *aluno* de Tycho Brahe...).

Aquelas aulas me fizeram acreditar que poderão existir algumas dificuldades na formação dos alunos dos formandos em Licenciatura em Física da UFRJ (aliás, tais dificuldades já existiriam, pois muitos formandos já atuam na profissão), pois apesar de um conteúdo preciso e correto em relação aos modelos científicos em Física, não tem havido a preocupação em ensinar um pouco sobre ciência. Sobre como ela se desenvolve. Sobre o que ela é. E principalmente sobre o que ela não é. Não devemos propagar uma visão deformada do trabalho científico aos jovens em formação, e, como veremos na introdução deste trabalho, muitas vezes isso acaba acontecendo, com consequências graves para o aprendizado dos estudantes.

Acredito que o conhecimento do processo de desenvolvimento científico é muito importante, e não deve ser deixado de lado. A compreensão desse desenvolvimento faria com que se fixasse melhor os conceitos – já que se estudaria os problemas que fizeram com que os homens se dedicassem a determinados tópicos, as dificuldades encontradas, a quantidade de pessoas que contribuíram para seu desenvolvimento, etc.

Com uma visão sobre ciência mais próxima da realidade, e compreendendo seu desenvolvimento, espero que tenhamos muito mais estudantes que sejam capazes de resolver problemas usando o raciocínio e os conceitos, e não apenas um conjunto de fórmulas matemáticas decoradas, que são aplicadas sob o método da tentativa e erro, sem maiores reflexões.

2 Introdução

Um trabalho publicado por Pérez et al. (2001), mostra que diversas vezes os professores possuem uma visão deformada do trabalho científico, propagando-a a seus alunos.

Como consequência, o tratamento dado pelos professores de nível médio ao ensino (de ciências, para ser mais genérico) é, diversas vezes, um tanto dogmático. Só se tem a preocupação de mostrar o “como é”, reduzindo-se assim o ensino à apresentação de seu formalismo e solução de problemas-padrão (CARVALHO, 2003, p.2644), que muitas vezes não fazem sentido para o aluno, e não o “como chegamos a”, que é muito mais importante. Tal atitude vai em sentido diametralmente oposto aos Parâmetros Curriculares Nacionais - PCN (BRASIL, 2000, p.6):

Os objetivos do Ensino Médio em cada área do conhecimento devem envolver, de forma combinada, o desenvolvimento de conhecimentos práticos, contextualizados, que respondam às necessidades da vida contemporânea, e o desenvolvimento de conhecimentos mais amplos e abstratos, que correspondam a uma cultura geral e a uma visão de mundo. Para a área das Ciências da Natureza, Matemática e Tecnologias, isto é particularmente verdadeiro, pois a crescente valorização do conhecimento e da capacidade de inovar demanda cidadãos capazes de aprender continuamente, para o que é essencial uma formação geral e não apenas um treinamento específico.

Uma “apresentação dogmática” da ciência – onde, segundo Perez et al (2001, p.135), se transmitem os conhecimentos já elaborados, deixando-se de lado os problemas que lhes deram origem, sua evolução, dificuldades encontradas etc., e não mostrando igualmente as limitações do conhecimento científico atual e nem as perspectivas futuras, faz com que se perca a visão de que, como afirma Bachelard (apud PEREZ ET AL, 2001, p.131), “todo o conhecimento é a resposta a uma pergunta”. Tal apresentação da ciência dificulta a compreensão da racionalidade de todo o processo e empreendimento científico, e acaba fazendo com que os alunos se sintam incapazes de trabalhar com ciência já que dessa forma os “homens da ciência” acabam sendo vistos como verdadeiros gênios (CARVALHO, 2003, p.2651), como os “donos”, ou até mesmo “criadores” da ciência. Além disso, segundo Vannucchi (1996, p.9), somente uma pequena parte dos alunos que terminam o Nível Médio continuará seus estudos na Universidade, ou se envolverá em atividades que necessitem de conhecimento operacional em Física. Assim, a atitude descrita acima não faz sentido.

De outra forma, ao se ensinar um pouco sobre ciência, os estudantes se sentiriam até mais dispostos e capazes de pesquisar, questionar e provavelmente não se sentiriam assim tão afastados dos grandes nomes da ciência. Provavelmente assim o problema de “medo de

ciência” pudesse ser diminuído, ou até mesmo extinto. E, extrapolando; sem aquele medo, o deficit de cientistas em nosso país poderia ser reduzido.

É claro que não há como fazer com que todos os tópicos, com todas as particularidades históricas e filosóficas sejam apresentados aos alunos do Nível Médio – Nem haveria tempo para tanto – além do que, segundo Guerra, Reis e Braga (2002, p.8), isso seria empobrecedor para o aluno. A questão é: Como fazer uma abordagem histórico-filosófica da ciência, de forma a resolver os problemas citados acima, “sem transformar as aulas de Ciências em aulas de História das Ciências?” (GUERRA, REIS E BRAGA, 2002, p.8).

O objetivo deste trabalho é propor um plano de aula usando a História e a Filosofia (da Ciência) como agentes facilitadores do aprendizado, uma vez que, sem elas, muitas vezes os conteúdos apresentados nos cursos científicos não têm onde se apoiar (no sentido de que “não se sabe de onde vieram e nem para que vieram”), o que faz com que os estudantes tornem-se cínicos a eles, não percebem a sua importância, a não ser para “passar de ano”.

Os Parâmetros Curriculares Nacionais – PCN falam, sobre a disciplina História:

A disciplina de História, pertencente à área de Ciências Humanas, ao estudar o desenvolvimento econômico e social na modernidade, pode apresentar um panorama amplo da história das ciências e das técnicas, nos últimos quatrocentos ou quinhentos anos, revelando em que medida a concentração de riqueza, em determinadas nações e em certos períodos, determinou sua capacidade de investimento científico-cultural e, vice-versa, em que medida sua cultura científica constitui vantagem estratégica. Ao estabelecer-se um paralelismo possível entre poder político ou econômico e desenvolvimento científico-tecnológico e cultural, desde a renascença até a presente “era do conhecimento”, incluindo portanto as três revoluções industriais, se estaria descortinando, ao longo do tempo, o cenário global em que o complexo científico-tecnológico se originou e evoluiu.

Tanto no aprendizado de História, como no de ciências, pode-se compreender como, em determinados períodos e circunstâncias, o conhecimento técnico-científico se mostrou mais determinante para o domínio militar, discutindo até mesmo aspectos éticos dos meios de destruição em massa, e como, em outros períodos, foi mais essencial para a hegemonia econômica, e como, em geral, ambos estes domínios frequentemente se sobrepõem. As máquinas térmicas, na revolução industrial inglesa, a tecnologia nuclear, na segunda guerra mundial e na “guerra fria”, os semicondutores e a informática, na terceira revolução industrial, são só alguns exemplos. Esse exercício histórico daria aos estudantes uma oportunidade de questionar e compreender melhor processos sociais, econômicos e culturais passados e contemporâneos e, além disso, auxiliaria a construir uma visão das Ciências da Natureza associada a outras dimensões da vida humana. (BRASIL, PCN+ Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias, p.18.)

Embora a citação acima faça referência à disciplina História, no intuito de esclarecer a relação entre as Ciências e “outras dimensões da vida humana”, sabe-se que a História pode

ser usada no ensino de Física, ilustrando como e porque surgiram algumas ideias, que dificuldades existiram para que determinados tópicos se firmassem, que tipo de necessidades guiaram as pesquisas, que benefícios surgiram, etc. Enfim, pode-se, usando a História, esclarecer de que forma “outras dimensões da vida humana” interferem no desenvolvimento científico. Com a introdução de alguns tópicos daquela maneira, leva-se os estudantes à reflexão sobre o que é a Ciência, e isso provavelmente fará com que se interessem.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira: Na primeira parte, o leitor encontrará uma introdução aos pressupostos teóricos para a introdução da História / Filosofia da Ciência no ensino. Em seguida, é realizada uma breve descrição sobre alguns episódios da História da Física, referentes à evolução da ideia da natureza ondulatória da luz. Será abordada principalmente a evolução das ideias de Huygens, que serão situadas no panorama científico que prevalecia na época – o mecanicismo. Segundo Silva (2007, p.149),

Nos manuais didáticos, sugere-se que os experimentos realizados nos últimos dois séculos não fizeram mais do que contrapor os cenários apresentados por Newton e Huygens há cerca de trezentos anos. Dessa forma, o leitor é induzido a supor que Huygens tivesse alguma intuição do conceito de ondas eletromagnéticas.

Em seguida apresenta-se uma proposta de aula, onde o tópico é introduzido levando-se em conta a História, tomando-se o cuidado de mostrar que “em ciências naturais as teorias não são eternas” (PLA. In HUYGENS e FRESNEL, 1945).

O leitor encontrará, no apêndice 1, alguns escritos sobre a Teoria Ondulatória da Luz (descrição do tópico, ou seja, a descrição do modelo matemático aceito hoje, como nos livros didáticos).

3 Justificativa para a utilização de história e filosofia da ciência na sala de aula

De acordo com Vannucchi (1996, p.14), a educação científica tem o objetivo de introduzir os estudantes ao domínio procedimental e conceitual da Ciência, abrangendo inclusive o aprendizado de seu contexto histórico de desenvolvimento.

Numa visão técnica de educação científica como a mostrada por Vannucchi, acredita-se que conhecer a Ciência não signifique apenas dominar suas leis e teorias, mas também conhecer seus processos: métodos, estrutura de desenvolvimento, organização. Para que os alunos possam compreender tais processos, se torna necessária a inclusão da História e Filosofia da Ciência.

Vannucchi (1996, p.14) afirma que a educação em geral deve buscar minimizar a fragmentação intelectual, e a atividade científica deve ser situada como parte do desenvolvimento cultural da humanidade, inserida, de acordo com as possibilidades, em panoramas mais abrangentes, onde a Ciência possa ser relacionada à Ética, Política, Religião e Economia. Guerra, Reis e Braga escreveram um artigo na revista **A Física na Escola** (V. 3, n. 1, 2002), intitulado *Um julgamento no Ensino Médio – Uma Estratégia para Trabalhar a Ciência sob Enfoque Histórico-Filosófico*, onde propõem um exercício que favoreceria uma visão crítica da Ciência e da Tecnologia. Argumentam que tal visão é necessária para o processo de formação da cidadania (com o que também concordam os PCNs), já que a sociedade exige dos cidadãos um posicionamento diante da Ciência e da Tecnologia. Como exemplo dessa necessidade de posicionamento pode-se citar a necessidade de se decidir em que direção os diversos ramos de pesquisa devem seguir, que tipo de tecnologia pode ou não ser usada (como por exemplo, armamentos com alto poder de destruição, transgênicos, abortamento, matrizes energéticas etc.), entre outros.

Vannucchi (1996, p.15) informa que:

Na última década, a integração entre História e Filosofia da Ciência e educação científica foi proposta em diversos países. Nos E.U.A., pela American Association for the Advancement of Science (AAAS) nos relatórios Project 2061 (1989) e The Liberal Art of Science (1990); na Inglaterra, pelo British National Curriculum Council (NCC 1988); pelo Science Council of Canada (SCC 1984); na Dinamarca, com o Danish Science and Technology curriculum, e na Holanda, com o PLON curriculum materials.

E argumenta que nos casos citados, “a História e a Filosofia da Ciência não são propostas como tópicos adicionais, mas como características dos cursos de Ciência.” (VANNUCCHI, 1996, p.15). De acordo com a Associação Americana para o Avanço da Ciência (American

Association for the Advancement of Science):

Os cursos de Ciência deveriam situá-la numa perspectiva histórica. [...] Os estudantes deveriam completar seus cursos de Ciência com uma apreciação desta como parte de uma tradição intelectual, social e cultural. Os cursos de Ciência devem contemplar estes aspectos enfatizando as dimensões ética, social, econômica e política da atividade científica (apud VANNUCCHI, 1996, p.15).

Segundo Pérez et al. (2001, p.126), numerosos estudos têm mostrado que, no ensino, não tem sido transmitida uma imagem adequada do que é a construção do conhecimento científico e que, ao contrário, tem se dado ênfase a visões empírico-indutivistas da ciência, visões que, ainda segundo eles, “se distanciam largamente da forma como se constroem e produzem os conhecimentos científicos”. Argumentam ainda que não se pode considerar sem importância essa desarmonia, mesmo tendo os professores cumprido sua “tarefa” de “transmissores do conhecimento científico”, pois esse procedimento de ensino baseado meramente na transmissão de conhecimentos gera, nos alunos, a cristalização de concepções epistemológicas inadequadas, ou até mesmo erradas, acerca do desenvolvimento científico. Tal situação dificulta o ato da “alfabetização científica”, preconizada nos PCNs, já que, se permitido fosse comparar este tema com a alfabetização escrita, estaria se criando “analfabetos funcionais científicos”. A introdução de tópicos de história e filosofia da ciência poderia minimizar tal problema, já que assim se teria a preocupação de mostrar aos alunos não somente os conhecimentos atuais sobre os conceitos científicos, mas também a sua evolução, que problemas solucionaram (ou criaram), como se interligam com as crenças (inclusive científicas) da época em que surgiram, seus métodos, etc. Fazendo, assim, com que se perceba a ciência como parte do desenvolvimento cultural da humanidade.

Segundo Matthews (1995, p. 165),

A história, a filosofia e a sociologia da ciência [...] podem humanizar as ciências e aproximá-las dos interesses pessoais, éticos, culturais e políticos da comunidade; podem tornar as aulas de ciências mais desafiadoras e reflexivas, permitindo, deste modo, o desenvolvimento do pensamento crítico; podem contribuir para um entendimento mais integral de matéria científica, isto é, podem contribuir para a superação do mar de falta de significação que se diz ter inundado as salas de aula de ciências, onde fórmulas e equações são recitadas sem que muitos cheguem a saber o que significam; podem melhorar a formação do professor auxiliando o desenvolvimento de uma epistemologia da ciência mais rica e mais autêntica, ou seja, de uma maior compreensão da estrutura das ciências bem como do espaço que ocupam no sistema intelectual das coisas.

Matthews não se refere acima meramente à inclusão de história, filosofia e sociologia

(HFS) da ciência¹ como mais um item do programa da matéria, mas sim de uma incorporação mais abrangente de temas de HFS da ciência na abordagem do programa. Argumenta ainda que

Os que defendem HFS tanto no ensino de ciências como no treinamento de professores, de uma certa forma, advogam em favor de uma abordagem “contextualista”, isto é, uma educação em ciências, onde estas sejam ensinadas em seus diversos contextos: ético, social, histórico, filosófico e tecnológico; o que não deixa de ser um redimensionamento do velho argumento de que o ensino de ciências deveria ser, simultaneamente, em e sobre ciências. Para usar a terminologia adotada pelo Currículo Nacional Britânico, os alunos de primeiro e segundo grau devem aprender não somente o conteúdo das ciências atuais mas também algo acerca da Natureza da ciência. (MATTHEWS, 1995, p. 166)

E acrescenta que o Conselho Britânico de Currículo Nacional (NCC) afirma que

Os estudantes devem desenvolver seu conhecimento e entendimento sobre como o pensamento científico mudou através do tempo e como a natureza desse pensamento e sua utilização são afetados pelos contextos sociais, morais, espirituais e culturais em cujo seio se desenvolvem (NCC apud MATTHEWS, 1995, p.167).

Tal afirmativa concorda com duas das afirmativas do item “Competências e habilidades”, subitem “contextualização sócio-cultural” dos PCNs, parte III – Ciências da Natureza, Matemática e suas tecnologias (BRASIL, 2000, p.13):

- Reconhecer o sentido histórico da ciência e da tecnologia, percebendo seu papel na vida humana em diferentes épocas e na capacidade humana de transformar o meio.
- Compreender as ciências como construções humanas, entendendo como elas se desenvolveram por acumulação, continuidade ou ruptura de paradigmas, relacionando o desenvolvimento científico com a transformação da sociedade.

Os PCNs trazem ainda uma crítica à maneira como a Física (e as ciências em geral) têm sido tratadas no ambiente escolar:

O ensino de Física tem-se realizado frequentemente mediante a apresentação de conceitos, leis e fórmulas, de forma desarticulada, distanciados do mundo vivido pelos alunos e professores e não só, mas também por isso, vazios de significado. Privilegia a teoria e a abstração, desde o primeiro momento, em detrimento de um desenvolvimento gradual da abstração que, pelo menos, parta da prática e de exemplos concretos. Enfatiza a utilização de fórmulas, em situações artificiais, desvinculando a linguagem matemática que essas fórmulas representam de seu significado físico efetivo. Insiste na solução de exercícios repetitivos, pretendendo que o aprendizado ocorra pela automatização ou memorização e não pela construção do conhecimento através das competências adquiridas. Apresenta o conhecimento como um produto acabado, fruto da genialidade de mentes como a de Galileu, Newton

1 Notem que iniciamos nosso texto usando o termo “história e filosofia da ciência”. Matthews vai mais além, e usa o termo “história, filosofia e sociologia (HFS) da ciência”, termo que doravante passaremos também a utilizar.

ou Einstein, contribuindo para que os alunos concluam que não resta mais nenhum problema significativo a resolver. (BRASIL, 2000, p.27) .

E afirma que

A Física percebida enquanto construção histórica, como atividade social humana, emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais, tendo se sucedido ao longo dos tempos, como o modelo geocêntrico, substituído pelo heliocêntrico, a teoria do calórico pelo conceito de calor como energia, ou a sucessão dos vários modelos explicativos para a luz. O surgimento de teorias físicas mantém uma relação complexa com o contexto social em que ocorreram. (BRASIL, 2000, p.27).

Matthews cita ainda um exemplo ilustrativo do tipo de compreensão e habilidades que o NCC tentou favorecer:

[...] habilidades a serem adquiridas por alunos de quatro a dezesseis anos, que deverão ser capazes de:

- distinguir entre asserções e argumentos pautados em dados e provas científicas e os que não o são;
- considerar a maneira pela qual o desenvolvimento de uma determinada teoria ou pensamento científico se relaciona ao seu contexto moral, espiritual, cultural e histórico;
- estudar exemplos de controvérsias científicas e de mudanças no pensamento científico (NCC apud MATTHEWS, 1995, p.167).

Pode-se notar que as habilidades preconizadas pelo NCC estão bem alinhadas com a proposta deste trabalho, pois de acordo com a citação acima, espera-se que os alunos sejam capazes de compreender alguns pormenores do desenvolvimento científico, além de conseguir discernir entre o que é científico e o que não é. Tal compreensão só seria possível com o estudo de HFS da ciência, que tornaria os cursos mais contextualizados.

Assim como Matthews, não estamos sugerindo a substituição dos temas do atual currículo por HFS da ciência, mas sugerindo que esses temas devam ser introduzidos junto com aqueles, de maneira que os alunos percebam que ainda existem “perguntas a serem feitas e que comecem a refletir não somente sobre as respostas para essas perguntas, mas, sobretudo, sobre quais as respostas válidas e que tipos de evidências poderiam sustentar essas respostas.” (MATTHEWS, 1995, p.168).

Vannucchi (1996, p.16) afirma que “a educação escolar, ao promover o desconhecimento histórico e metodológico da Ciência, tem sido veículo de “dogmatismo e preconceito.”” E acrescenta:

[...] o desenvolvimento da racionalidade pode ser favorecido pela introdução dos estudantes no debate de questões polêmicas constituintes ou relativas aos processos de desenvolvimento da Ciência. Nesse contexto, além do desenvolvimento de habilidades lógicas, de argumentação e comunicação de ideias, propicia-se a tomada de consciência das condicionantes contextuais

da atividade científica.” (Idem, p.18).

Michel Polanyi (apud Vannucchi, 1996, p.21) faz um paralelo com outras disciplinas, e nos permite afirmar que a HFS da ciência deveria ser pelo menos parte do ensino de ciência, assim como a crítica literária e musical o são no ensino de literatura e música. Não existe um bom curso de literatura que não contemple elementos de crítica literária, história das formas literárias, a subordinação da literatura aos períodos históricos e acontecimentos sociais etc.

Nesse sentido, pode-se citar ainda o relatório *Ciências para todos os americanos*, que apresenta as recomendações do Conselho Nacional de Educação em Ciências e Tecnologia para o ensino de Ciências nos cursos de primeiro e segundo graus, onde se afirma que:

Há duas razões principais para que se inclua algum conhecimento sobre história entre as recomendações. Uma delas é o fato de que generalizações sobre o funcionamento dos empreendimentos científicos não têm sentido se não forem fornecidos exemplos concretos. A segunda razão é o fato de que alguns episódios na história das buscas científicas são bastante significativos para a nossa herança cultural; por exemplo, o papel de Galileu na mudança de percepção de nossa posição no universo”. (apud MATTHEWS, 1995, p. 168)

Para Matthews, converter projetos de currículos em realidade de sala de aula (ele fala aqui sobre o britânico e o americano, mas cremos que esses argumentos poderiam se aplicar também ao caso brasileiro)

[...] requer novas orientações para a prática e a avaliação, novos materiais didáticos e, acima de tudo, a inclusão de cursos adequados sobre HFS no treinamento de professores. Também será necessário, como está claro nas propostas do projeto 2061, que se proceda a uma gradação decrescente do conteúdo dos currículos que, hoje, são “entupidos, porém mal-nutridos” (AAAS, 1989, p.14). [...] Por isso, hoje leva-se em consideração aquilo que Mach defendia no século passado: ensinar-se menos para se aprender mais. Mach via a questão assim: “Creio que a quantidade de matéria necessária para uma educação de valor (...) é muito pequena (...) Não conheço nada mais deplorável do que as pobres criaturas que aprenderam mais do que deviam (...) O que elas conseguiram foi uma teia de pensamentos frágeis demais para fornecer base sólida, porém complicados o bastante para gerar confusão” (Mach, 1943, p.366). (MATTHEWS, 1995, p. 169)²

Vannucchi (1996, p.21) afirma que deveriam ser abordadas, nos cursos de Ciências, questões epistemológicas como o papel da idealização e das experiências de pensamento, a

2 Essa posição é um tanto controversa, ainda mais no caso brasileiro, onde não se leva em consideração a máxima citada: “[...] ensinar-se menos para se aprender mais [...]”, e se discute não a contração do currículo, mas a inclusão de novos tópicos em Física (como Física Moderna). A ideia de ampliar o currículo é, no mínimo, contraditória, já que não seria possível cumprir diretrizes preconizadas nos PCNs – como contextualização, posicionamento histórico e social, etc. – num prazo (que se torna curto para tanto) de três anos. Outrossim, pode-se perceber, observando o resultado de avaliações nacionais (ENEM) ou mesmo vestibulares, que um currículo tão inflado não produz bons resultados. A função deste texto não é sugerir mudanças no currículo, mas não se pode deixar de tocar nesse assunto, a título de “sugestão para reflexão”. Talvez seja mesmo necessário revisar o conteúdo do currículo ou seu prazo de implementação.

importância da fé religiosa dos cientistas, aspectos metafísicos dos grandes debates, além de fatores políticos, econômicos e sociais do desenvolvimento científico. Assim, citando Laudan (1977) – que evidenciou uma subordinação entre teorias e tradições de pesquisa a uma rede mais ampla de crenças e concepções – afirma que

[...] as respostas de diferentes tradições de pesquisa a questões como: O que pode ser reconhecido como um problema relevante? Quais objeções podem ser consideradas problemas conceituais? Quais os critérios de inteligibilidade? Quais os padrões de controle experimental? – têm mudado drasticamente ao longo da história e são distintas para culturas distintas. (VANNUCCHI, 1996, p.21)

Acreditamos que tal preocupação no ensino de Física (e Ciências em geral) faria com que desaparecesse a atitude que motivou a crítica apresentada no prólogo e na introdução deste trabalho. Os alunos seriam capazes de compreender que o fato de uma teoria (científica) não mais ser aceita, não a torna a-científica. Mais que isso, passariam a compreender o que realmente a Ciência é: Uma grande construção do intelecto humano, porém, eternamente inacabada. Em constante evolução.

Aqui se encerra este breve capítulo, que é um convite à reflexão sobre que atitudes se poderia tomar para fazer com que os estudantes brasileiros passassem a encarar o aprendizado de Ciências em geral não como mais uma etapa burocrática para a obtenção de um diploma, mas como o que ele realmente é: Cultura.

Acreditamos que o uso de HFS da ciência é um dos passos necessários a se atingir tal objetivo.

4 A evolução do conceito de natureza ondulatória da Luz

4.1 Introdução

Segundo Silva (2007, p.149), quando se escreve sobre a história do conhecimento sobre a natureza da luz, costuma-se criar uma polarização entre os defensores da teoria corpuscular da luz e os defensores da teoria ondulatória, mostrando que, de tempos em tempos, um grupo parecia estar “mais certo” do que o outro, até que, no século XX, as duas teorias foram aceitas. Nos séculos XVII e XVIII prevaleceu a teoria corpuscular (de certa forma, graças ao prestígio de Newton, que a defendia), mas no início do século XIX, os dados experimentais de Young e Fresnel mostraram a necessidade de uma teoria ondulatória para a luz. Mais tarde novos efeitos vieram a ser observados e chegou-se à conclusão de que a luz possui um caráter dual, de onda e de partícula.

As definições atuais sobre o comportamento ondulatório da luz são bem diversas das propostas por Huygens, que imaginava a luz como uma perturbação mecânica se propagando através de forças de contato entre corpúsculos, não fazendo menção alguma à ideia de ação à distância, campo eletromagnético e outros conceitos mais recentes. Não cita nem mesmo características elementares como a amplitude, frequência, período ou comprimento de onda. Ou seja, a interpretação contemporânea da teoria ondulatória da luz inexistia na mente de Huygens. É importante frisar isso, pois diversas vezes os alunos acham que toda a teoria foi elaborada por uma única pessoa, criando uma visão distorcida da Ciência. E muitas vezes, os professores não atentam para esse importante detalhe, e acaba-se atribuindo a Huygens (que viveu no século XVII) a interpretação atual da teoria ondulatória da luz.

Em seu *Tratado da Luz*, Huygens explica, em termos do mecanicismo, as causas do que ocorre na reflexão, na refração e na estranha refração do cristal da Islândia (calcita). Os modelos para explicar a luz no século XVII eram baseados no mecanicismo, e procuravam explicar a propagação retilínea da luz, a reflexão, refração e a origem das cores.

4.2 Cenário em que surgiu o *Tratado da Luz*

Deve-se situar o trabalho de Huygens no contexto de sua época. O mecanicismo se firmava como o método da filosofia natural. Importantes contribuições foram os trabalhos de Galileu (1564-1642), René Descartes (1596-1650), Pascal (1623-1662), Robert Hooke (1635-1703), Kepler (1571-1630), Robert Boyle (1627-1691), Isaac Newton (1642-1727), etc.

A concepção newtoniana de espaço contínuo, homogêneo e infinito ainda não existia. Ainda havia quem defendesse a teoria dos constituintes básicos da matéria (terra, fogo, água e

ar). No início do século XIX ainda se debateria muito sobre o éter e o flogístico.

Em 1647 Pascal explica, em termos de forças mecânicas, as diversas experiências barométricas que realizou. Chegando ao princípio de corpos líquidos, faz uma estimativa do peso do ar e conclui pela existência do vácuo.

Descartes já havia publicado, em 1637, trabalhos onde apresentou a lei dos senos para a refração, um modelo para a formação dos arco-íris, além de descrever experiências de refração com prismas e globos de vidro cheios de água (*La Dioptrique* e *Les Météores*), além de uma descrição do mundo (*Le Monde*), de onde se poderia descrever a natureza da luz em termos de partículas em movimento.

Em 1665, em seu trabalho *Micrographia*, Hooke descreve experiências onde se verifica a presença de luz na sombra de objetos iluminados, defende que a luz seria composta por pulsos de pequena amplitude (se propagando num meio contínuo), e que possuiria apenas duas cores básicas: vermelho e azul. As outras cores seriam produzidas a partir daquelas, através de refrações. Hooke também descreveu em seu trabalho as imagens das “cores de lâminas delgadas” (que seriam as cores produzidas por lâminas transparentes e finas, de faces paralelas, iluminadas com luz branca). Tais imagens são explicadas hoje como um fenômeno de interferência e difração, esta última relatada primeiramente pelo físico italiano Francesco Maria Grimaldi, num trabalho publicado postumamente, também em 1665, denominado *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*. Grimaldi demonstrou que um feixe de luz branca, ao atravessar dois orifícios estreitos, situados um atrás do outro, atingindo em seguida um anteparo branco, fará aparecer uma região iluminada maior do que a que deveria existir se a luz se propagasse em linha reta, como se a luz se “encurvasse” ao atravessar os orifícios. Verificou também que nas bordas daquela região iluminada havia uma leve coloração avermelhada e azulada (talvez essa mesma observação tenha levado Hooke a imaginar que a luz possuísse apenas duas cores básicas). As colorações azulada e avermelhada verificadas por Grimaldi indicam um fenômeno de difração, fato que foi esclarecido mais tarde, em 1801, por Young. Experimentos similares àqueles, com o uso de películas finas iluminadas com luz branca foram também realizados, independentemente, por Robert Boyle.

Os trabalhos de Hooke e Boyle levaram Newton a estudar (em 1666) as cores exibidas por películas finas (fenômeno que conhecemos como *anéis de Newton*). Ele propôs que a luz branca, ao atravessar um prisma de vidro, seria decomposta nas cores do arco-íris (fenômeno da dispersão da luz). Para verificar se as cores eram criadas pelo prisma, ou se estavam presentes na luz, Newton fez passar essas cores por um outro prisma (invertido em relação ao primeiro), obtendo assim, como resultado, novamente a luz branca. Verificou ainda que se

somente uma das cores atravessasse um prisma, não aconteceria mais nenhuma decomposição cromática, uma vez que o feixe resultante apenas se alargava ou se estreitava, dependendo da incidência do feixe no prisma, não havendo modificação na cor. Segundo Bassalo (1987, p.142), a hipótese de que a luz branca é uma combinação das cores do arco-íris pode ser confirmada por intermédio de um experimento que ficou conhecido como *o disco de Newton*, que é constituído de um disco contendo as referidas cores que, ao ser posto a girar, aparece branco³.

Observando uma superfície pintada de azul e vermelho, Newton notou que para um mesmo ângulo, o prisma apresentava uma refração diferente para cada cor, concluindo então que o índice de refração variava com a cor.

Segundo Silva (2007, p.152), é nesse contexto de afirmação do mecanicismo que a obra de Huygens deve ser interpretada. Ele ainda elaboraria sua própria teoria sobre o choque elástico (1656-1657), em 1659 encontra uma expressão quantitativa para a força centrífuga e chega, ainda no mesmo ano, à conclusão de que o tempo de queda de um ponto material ao longo de uma cicloide não é dependente da amplitude dessa cicloide. Tal resultado teórico possibilitou o aperfeiçoamento do relógio a pêndulo. Não ficando satisfeito com o desempenho do relógio aperfeiçoado, Huygens inventa um relógio cuja base de tempo era dada por um oscilador harmônico de rotação, mecanismo este usado até hoje nos relógios mecânicos. Interessou-se ainda por muitos outros assuntos ligados à mecânica, como o movimento de projéteis em meios resistivos, resolvendo os casos em que a resistência ao movimento é proporcional à velocidade e ao quadrado da velocidade.

Compreendido o cenário onde estava inserido Huygens, pode-se perceber que o mecanicismo era seu ponto de partida, e que nada havia em sua mente que se parecesse, nem de longe, com a teoria eletromagnética que seria desenvolvida mais tarde. Com isso em mente, pode-se então passar a estudar o *Tratado da Luz* de Huygens.

4.3 O Tratado da Luz

Huygens inicia o primeiro capítulo com uma declaração onde vincula o trabalho à tradição geométrica da Física desenvolvida no Renascimento:

As demonstrações que se referem à Óptica, como acontece com todas as ciências em que a geometria se aplica à matéria, estão fundamentadas em

³ Silva e Martins (2003) fazem uma grave crítica à maneira como a teoria das cores de Newton é apresentada aos estudantes (mesmo no nível universitário), levando-os a crer que é fácil chegar às mesmas conclusões que Newton a partir dos seus experimentos, o que, segundo eles, não é real. Em suas palavras: "... Eles tentam mostrar como se obtém uma teoria a partir da observação e experimentos ou como se pode *provar* uma teoria – apesar da impossibilidade filosófica de ambas as tentativas." (SILVA e MARTINS, 2003, p.54)

verdades deduzidas da experiência, como por exemplo: os raios de luz se propagam em linha reta; os ângulos de reflexão e de incidência são iguais; nas refrações o raio se quebra segundo a regra dos senos, regra bem conhecida e não menos correta do que as precedentes. (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.37, tradução nossa).

Sobre a natureza da luz, ele diz acreditar que consista no movimento de algum tipo de matéria. Argumenta que sua principal fonte, o fogo, contém corpos em rápido movimento, uma vez que dissolve e funde outros corpos sólidos. Falando sobre os efeitos da luz, argumenta que quando concentrada num ponto, por intermédio de espelhos côncavos, a luz tem a propriedade de queimar como o fogo, o que mostraria que ela também possui corpos em rápido movimento. Para ele, renunciar a essa definição mecânica para a luz seria “abandonar a verdadeira filosofia, onde se credita a causa de todos os efeitos naturais a razões mecânicas.” (HUYGENS e FRESNEL, 1945 p.38). Está claro que para ele a única maneira de compreender o mundo físico, seria através do estudo da mecânica, como ele mesmo escreve na frase seguinte.

Discorrendo sobre a propagação da luz, ele argumenta que ela não poderia ser comparada a um projétil, mas compara sua propagação à do som:

Sabemos que por meio do ar – que é um corpo invisível e impalpável – o som se propaga ao redor do local onde foi produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma a outra parte do ar, e que a propagação deste movimento realiza-se com a mesma velocidade em todas as direções, formando superfícies esféricas que aumentam constantemente e chegam a tocar nosso ouvido.

Ora, não pode haver dúvida de que a luz venha desde o corpo luminoso até nós por meio de algum movimento impresso à matéria que se encontra entre os dois, posto que já vimos que tal não pode ocorrer devido ao transporte de um corpo que passe de um ao outro. (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.39, tradução nossa).

Assim, Huygens afirma a origem mecânica da natureza da luz, além da necessidade de um meio material para sua propagação, e afasta a hipótese de uma natureza corpuscular para a luz.

Quando considera o som e, mais adiante, as ondas produzidas na superfície da água, quando abalada pela queda de uma pedra, defende que, a exemplo desses casos, a luz tenha uma velocidade finita. Faz então um relato da experiência de Roemer, realizada em 1676⁴, que estimou a velocidade da luz em cerca de 214 mil km/s, e argumenta que “[...] o som percorre 180 toesas em um segundo, portanto, a velocidade da luz é superior a seiscentas mil vezes a

4 Aqui cabe observar que, segundo Bassalo (1987, p.146), poucos cientistas da época, entre eles Newton e Huygens consideraram válido o raciocínio de Roemer. Isso se explica pelo grande apego que se tinha à ideia de que a luz possuía velocidade infinita.

velocidade do som, o que é muito diferente de ser instantânea, [...]”⁵ (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.45, tradução nossa).

Em seguida ele argumenta que se o som e a luz se propagam da mesma maneira, a saber: em ondas esféricas, e de maneira não instantânea; o mesmo não pode ser dito sobre outras características, entre elas, os movimentos que os produzem, a matéria onde se propagam, e a forma pela qual se comunicam.

Em relação à produção do som, diz que se origina da perturbação sofrida por um corpo, ou por uma considerável parte dele, que passa então a agitar o ar à sua volta. Em contrapartida, a luz deve surgir do movimento de cada ponto do objeto luminoso, para que se possa perceber todas as partes desse objeto.

Segundo Huygens, a matéria onde se propagam as ondas luminosas não pode ser o ar, pois quando é feito vácuo num recipiente de vidro contendo um objeto sonoro, o som deixa de ser ouvido, mas a luz continua a atravessá-lo, ou seja, a outra matéria, imponderável e que pode atravessar o vidro ou qualquer outro corpo, lá permanece (o éter).

Sobre a forma de propagação dos movimentos do som, sabe-se que o ar, por sua natureza, pode ser comprimido, e que, à medida em que é comprimido, reage, de maneira a expandir-se. Essa propriedade, associada à penetrabilidade, que permanece apesar da compressão, parece provar que o ar é composto por pequenos corpos que nadam e são agitados muito rapidamente na matéria etérea, composta de partes bem menores. Dessa maneira, a causa da propagação das ondas do som seria o esforço de expansão que esses pequenos corpos realizam quando estão mais comprimidos nas proximidades dessas ondas.

Mas a extrema velocidade da luz, e outras propriedades que ela possui, não poderiam admitir essa forma de propagação do movimento. Para explicar a maneira como imaginou que essa propagação pudesse ocorrer, ele fez uma analogia com a transmissão de movimento em corpos sólidos:

Quando tomamos um número de esferas de igual diâmetro, feitas de qualquer matéria muito dura, as distribuimos em linha reta de maneira que se toquem, e golpeamos, com uma esfera similar, a primeira dessas esferas, se observa que o movimento passa rapidamente desta até a última, que se separa da fila sem que se perceba movimento nas outras, permanecendo imóvel até aquela que se chocou com a primeira. Pode-se ver, então, que o movimento é transmitido com grande velocidade, que será tanto maior quanto maior for a dureza da matéria das esferas.(HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.48, tradução nossa).

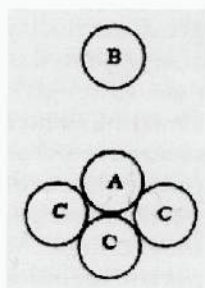
Em seguida ele chama a atenção para o fato de que a transmissão do movimento não é

5 180 toesas equivalem a 350,83 metros. Huygens determinou esse valor em 8 de outubro de 1669, baseando-se no fenômeno do eco (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.42)

instantânea, mas sucessiva. Do contrário, todas as esferas deveriam se mover ao mesmo tempo após a colisão, coisa que não acontece.

Mais adiante em seu texto, estima que as partículas que compõem o éter possam se aproximar tanto quanto se queira da dureza perfeita e da elasticidade ideal. Afirma, ainda, que se pode dizer que essas partículas, apesar de muito pequenas, são compostas de outras partes, e que sua elasticidade deriva de um movimento muito rápido de uma matéria sutil (fluida), que as atravessa por todos os lados, e obriga sua estrutura a assumir uma disposição que ofereça a menor resistência possível à passagem desse fluido. Um outro argumento, segundo Huygens, para a característica elástica dos corpúsculos do éter, seria o fato de a luz se mover com velocidade constante, o que só seria possível caso os corpúsculos de éter tivessem a propriedade de voltar rapidamente à posição de equilíbrio, quer sejam fortemente ou debilmente impulsionados. Do contrário, a luz diminuiria sua velocidade ao se afastar da fonte.

Ainda segundo Huygens, a luz deveria se propagar em ondas esféricas, já que as partículas do éter não são alinhadas, mas distribuídas de forma confusa, de maneira que uma toque várias outras. Tal distribuição não impediria que transmitissem o movimento sempre para a frente. Mostra, então, uma analogia com uma colisão de esferas mostrada na figura, e argumenta que não há a necessidade de as partículas do éter serem esféricas (embora essa característica contribua com a propagação do movimento), mas que a igualdade de tamanho parece ser mais necessária, já que se assim não o fosse, haveria uma reflexão do movimento para trás, quando uma partícula menor se chocasse com uma maior.



A esfera A, em contato com 3 outras esferas idênticas C, é atingida por uma quinta esfera B. A esfera A comunica o movimento às esferas C e, após a colisão, as esferas A e B permanecem imóveis.

Apesar de se supor que as partículas de éter estão em constante movimento, a propagação das ondas não é impedida, posto que ela não consiste no transporte dessas partículas, mas apenas de uma pequena vibração, que elas não podem deixar de comunicar àquelas que as rodeiam, apesar do movimento que as agita e as faz trocar de lugar entre si.

Ele passa então a discutir a origem das ondas e a maneira como se propagam. Supõe que cada ponto de um corpo luminoso crie suas ondas:

Em primeiro lugar, decorre do que foi dito sobre a produção da luz, que cada pequeno ponto de um corpo luminoso – como o sol, ou uma vela, ou um carvão queimando – cria suas ondas, cujo seu centro é esse ponto. Assim, na chama de uma vela, os círculos concêntricos descritos ao redor de cada um dos pontos A, B, C, representam as ondas que eles originaram. Deve-se conceber o mesmo para cada ponto da superfície e da parte interna da chama. (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.52, tradução nossa).



Segundo Huygens, uma enorme quantidade de ondas deverá se cruzar, sem confusão, e sem que as ondas se destruam mutuamente:

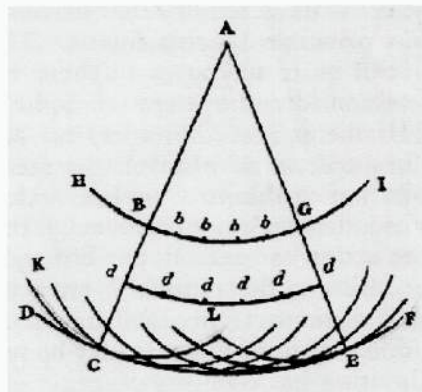
Por outro lado, não deve parecer inconcebível que esta prodigiosa quantidade de ondas se atravessem sem confusão e sem destruir-se mutuamente, sendo certo que uma mesma partícula de matéria pode servir a várias ondas provenientes de diferentes direções ou mesmo de sentidos opostos, não apenas por perturbações sucessivas, mas também para aquelas [perturbações] que agem sobre ela simultaneamente. (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.52, tradução nossa).

Argumenta ainda que uma mesma partícula de matéria pode servir à transmissão de várias ondas, simultaneamente ou não, vindas de diversas direções (e mesmo de sentidos opostos), e, para explicar o longo alcance da luz, segundo ele propagada por pequeninas partículas em pequeníssima oscilação, ele escreve:

O que em princípio pode parecer demasiadamente estranho e até mesmo incrível, é que as ondas produzidas por movimentos e corpúsculos pequenos possam propagar-se a distâncias tão imensas como as que existem desde o Sol ou desde as estrelas até nós; posto que a força destas ondas deve diminuir à medida que se afastam de sua origem, de modo que a ação de cada uma em particular seria certamente incapaz de fazer sentir seus efeitos sobre nossa visão. No entanto, a admiração cessará se se considerar que, a uma grande distância do corpo luminoso, uma infinidade de ondas, ainda que originadas em pontos diferentes do corpo, unem-se de maneira a se comportarem como uma única onda que, portanto, deve ter intensidade suficiente para se fazer sentir. Assim, este número infinito de ondas que nascem, em um mesmo instante, de todos os pontos de uma estrela fixa – possivelmente tão grande quanto o Sol – forma uma só onda que pode ter bastante força para impressionar nossos olhos. [...] Deve-se considerar que na *emanação dessas ondas, cada partícula da matéria em que uma onda se propaga não deve comunicar seu movimento somente à partícula próxima que se encontra na linha reta traçada do ponto luminoso, mas que necessariamente o comunica também a todas as outras que a tocam e que se opõem a seu movimento. De modo que é necessário que ao redor de cada partícula se forme uma onda cujo centro é ela mesma.*

Assim, se DCF é uma onda emanada do ponto luminoso A, que é seu centro, a partícula B, que é uma das compreendidas no interior da esfera DCF, terá formado sua onda particular KCL, que tocará a onda DCF em C, no mesmo instante em que a onda principal emanada do ponto A terá chegado a DCF; e é claro que não existirá outro ponto além do C da onda KCL que tocará a onda DCF, ou seja, aquele que se encontra na reta traçada por AB.

Da mesma forma, as outras partículas compreendidas na esfera DCF, como bb, dd, etc., terão formado cada uma a sua onda. Mas cada uma dessas ondas é infinitamente fraca se comparada com a onda DCF, para cuja composição recebe contribuição de todas as outras, através da parte de suas superfícies que estão mais afastadas do centro A. (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.52 a 54, tradução nossa).



O princípio descrito na citação acima ficou conhecido como o *princípio de Huygens*, que basicamente afirma que “cada ponto de uma frente de onda comporta-se como fonte puntiforme de novas ondas, chamadas de ondas secundárias⁶. [...] A frente de onda num instante posterior é a envoltória das frentes das ondas secundárias dela emanadas.” (NUSSENZVEIG, 1996, p.142) Em seguida ele explica, baseando-se em seu princípio, a propagação retilínea da luz:

Para chegar às propriedades da luz, notemos primeiramente que cada parte da onda deve propagar-se de forma que seus extremos sempre estejam compreendidos entre as mesmas linhas retas traçadas desde o ponto luminoso. Assim, a parte da onda BG, que tem como centro o ponto luminoso A, se propaga no arco CE limitado pelas retas ABC e AGE, pois mesmo quando as ondas particulares produzidas pelas partículas que compreendem o espaço CAE se expandam fora dele, elas não concorrem no mesmo instante para compor a onda que termina o movimento, que tem precisamente na circunferência CE sua tangente comum.

Daqui se compreende a razão pela qual a luz, salvo quando seus raios são refletidos ou refratados, se propaga somente em linhas retas, de modo que não ilumina nenhum objeto a não ser quando o caminho da fonte ao dito objeto está compreendido entre tais linhas. Pois se, por exemplo, tem-se uma abertura BG limitada por corpos opacos BH, GI, a onda de luz que sai do ponto A estará sempre limitada pelas retas AC, AE, como acaba de ser demonstrado, pois as partes das ondas particulares que se estendem para fora do espaço ACE são muito fracas para produzir luz. (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.54 e 55, tradução nossa).

Em sua proposição, totalmente baseada na mecânica, Huygens não foi capaz de prever a existência do fenômeno da difração. Ele argumenta que por mais que diminuamos a abertura

6 No *Tratado*, Huygens se refere a essas ondas como “ondas particulares”.

BG, a luz sempre se encontrará entre duas linhas retas, pois essa abertura será sempre grande o suficiente para conter um grande número de partículas de matéria etérea, que são inconcebivelmente pequenas, de forma que esse princípio é sempre válido. A importância que ele dá a essa proposição pode ser verificada na seguinte afirmação: “pois, como se verá mais adiante, todas as propriedades da luz e tudo o que pertence a sua reflexão e refração se explicam principalmente por este meio.” (HUYGENS e FRESNEL, 1945, p.54).

4.4 A teoria ondulatória a partir do século XIX

Durante séculos o debate sobre a natureza da luz envolveu renomados estudiosos como Isaac Newton, Jean Baptiste Biot, Joseph Boscovich e Laplace – que defendiam a hipótese corpuscular – e aqueles que não admitiam o vácuo, Robert Hooke, Christiaan Huygens, Thomas Young, Augustin Jean Fresnel, Armand Hyppolyte Louis Fizeau e Jean Baptiste Leon Foucault – defensores da hipótese ondulatória.

Estava envolvida nessa polêmica a aceitação ou não do conceito de vácuo e suas implicações. Como poderiam ocorrer ações a distância no vazio?

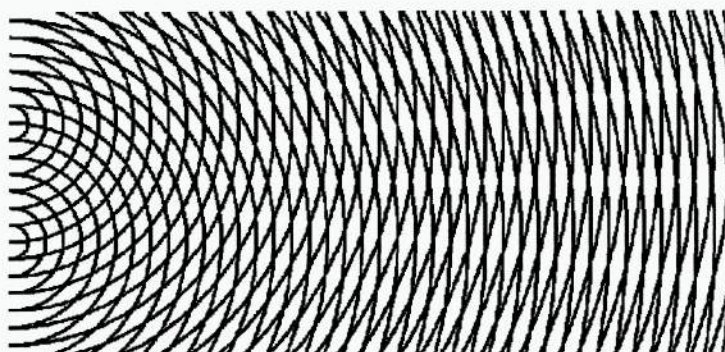
Newton muito contribuiu para o desenvolvimento experimental e teórico da ótica, construindo seus próprios instrumentos e dedicando muito tempo de sua vida científica ao estudo dos fenômenos óticos. Uma de suas hipóteses sobre a natureza da luz era a de que ela se constituía de feixes de corpúsculos que se deslocavam no vácuo em linha reta. Tais corpúsculos poderiam atravessar materiais transparentes e eram refletidos por superfícies opacas. Essa teoria corpuscular explicava fenômenos como as leis da reflexão e da refração, que podiam ser consideradas casos específicos das leis de conservação do movimento (CARUSO e OGURI, 2006, p.148).

Havia ainda um problema com a teoria ondulatória para a luz: Por que não se observava com a luz o fenômeno de difração⁷ que acontece com as ondas na água ou com o som? Ou seja: Por que a luz não “contornava” os obstáculos, como o som ou as ondas na água? Esse fato, associado ao prestígio científico de Newton, tornou difícil a aceitação da teoria ondulatória para a natureza da luz. Essa situação seria revertida somente no século XIX, quando a hipótese ondulatória da luz passou a ter grande credibilidade, devido às experiências de Young e Fresnel sobre a interferência e difração da luz e, além disso, com as medições da

7 No caso da luz, a difração se observa quando o tamanho de um orifício por onde ela passe for pequeno, do ponto de vista macroscópico, mas, ao mesmo tempo grande, se comparado ao comprimento de onda da luz que o atravessa. Cabe ainda ressaltar que o físico italiano padre Francesco Maria Grimaldi já havia descoberto o fenômeno de difração da luz, que foi divulgado postumamente em 1665 (BASSALO, 1987).

velocidade da luz em diferentes meios⁸, realizadas por Fizeau, Breguet e Foucault⁹

Thomas Young (1773-1829), estimulado por experimentos que tratavam da interferência em ondas de água e em pulsos de som, experimentos nos quais ele percebeu que existem regiões em que há a destruição dessas ondas, além de outras regiões onde elas se reforçam, imaginou que o mesmo poderia ocorrer com a luz. Então, em novembro de 1801, julho de 1802 e novembro de 1803, leu, na *Royal Society*, alguns trabalhos resultantes de suas experiências sobre óptica, onde exaltou a teoria ondulatória para a luz e apresentou um novo conceito nessa teoria, o *princípio da interferência*: “quando duas ondulações, provenientes de pontos diferentes, coincidem perfeitamente ou quase, em um ponto, o efeito resultante é uma combinação dos movimentos independentes de cada ondulação” (BASSALO, 1989, p.38).



Interferência de ondas

Nesses experimentos ele obteve em um anteparo, pela primeira vez, uma *figura de interferência luminosa*, com padrões de intensidade similares aos padrões de interferência em ondas sonoras.

Com uma fina agulha Young fez um pequeno orifício em um anteparo pelo qual fez passar a luz do sol. A luz emergente deste orifício dispersa-se por difração, incidindo sobre um segundo anteparo contendo agora dois orifícios muito próximos, construídos também com a agulha. A Fig. 1 mostra o experimento de Young. Neste arranjo, cada orifício atua como uma fonte puntiforme de ondas esféricas secundárias. A luz difratada nos orifícios S_1 e S_2 dispersa-se na região entre o anteparo B e a tela de observação C. Nesta região, as ondas se superpõem, interferindo-se construtiva ou destrutivamente. Numa tela C distante pode-se visualizar o padrão de interferência da luz, caracterizado por uma figura de intensidade luminosa variável onde se mesclam alternadamente zonas de maior intensidade com zonas de menor intensidade, ocorrendo entre elas intensidades

8 Essas medições da velocidade da luz foram importantes pois ajudaram a resolver a controvérsia entre as teorias corpuscular e ondulatória. De acordo com a teoria corpuscular, a velocidade da luz deveria ser tanto maior quanto mais denso fosse o meio que ela atravessasse. Entretanto, a teoria ondulatória indicava exatamente o contrário, o que de fato pôde ser confirmado nessas medições.

9 Segundo Bassalo (1989), em 1850, Foucault, seguindo uma sugestão de Arago, determina a velocidade da luz tanto no ar quanto na água. Nesse mesmo ano, Fizeau e Breguet, seguindo a mesma sugestão, também chegaram à velocidade da luz no ar e na água.

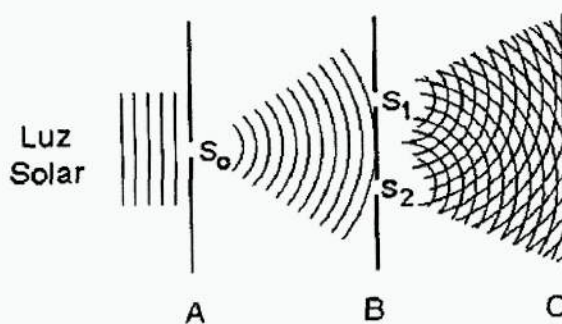


Fig.1 - Montagem de Young com luz solar. S_0 , S_1 e S_2 são orifícios com diâmetro a . Os orifícios S_1 e S_2 possuem um afastamento linear d .

intermediárias. (BRAUN, L. e BRAUN, T., 1994, p.184).

Tal observação o levou a crer que os fenômenos óticos seriam resultantes de movimentos ondulatórios que, para acontecerem, necessitavam de um meio: o éter. (CARUSO e OGURI, 2006, p.148).

O resultado desses experimentos lhe permitiu calcular o comprimento de onda da luz solar, encontrando um valor médio de 570nm. Também pôde Young – baseado em suas conclusões, e usando dados de Newton – explicar os famosos *anéis de Newton*. Para ele, “esses “anéis” decorriam da interferência entre ondas incidentes, refletoras e refratadas na camada de ar variável existente entre a lente e a lâmina que são utilizados para obter tais “anéis”.” (BASSALO, 1989, p.38).

Segundo Bassalo (1989, p.39 e 40), em 1808, o físico francês Étienne-Louis Malus (1775-1812), estimulado por um prêmio oferecido pela Academia de Ciências de Paris – prêmio oferecido a quem apresentasse um estudo matemático sobre a dupla refração, e o confirmasse experimentalmente – observava, através de um espato-da-islândia (calcita), a luz do sol refletida nas janelas do Palácio de Luxemburgo, quando observou que as duas imagens obtidas por dupla refração no cristal variavam em intensidade, chegando uma delas a desaparecer quando o cristal de calcita fosse girado em torno da direção do raio solar refletido. Verificou também que esse fenômeno não acontecia quando ele observava a luz do sol diretamente através do cristal. Assim, acabara de descobrir a *polarização por reflexão*. Ele começou então a fazer diversas experiências onde estudava a incidência de luz em superfícies transparentes. Observou que quando um feixe de luz incide sobre a superfície da água, tem uma parte refletida e outra parte refratada. E, quando o ângulo de incidência é de $52^{\circ}45'$, a parte refletida é polarizada, e tem as características do raio refletido pelas vidraças do Palácio de Luxemburgo. Ou seja, se ele atravessar um cristal de calcita cuja seção principal é paralela ao plano de reflexão, ele não será dividido, e só emergirá o raio ordinário. Se a seção principal

for perpendicular, só emergirá o raio extraordinário.

Segundo Silva (2007, p.155), essa descoberta trouxe dificuldades aos defensores da teoria ondulatória. Young reconhece isso numa carta que enviou a Malus (em 1811), onde afirma que os experimentos realizados por Malus demonstram a insuficiência de sua teoria ondulatória, apesar de não comprovarem sua falsidade.

Nove anos após a descoberta de Malus, em janeiro de 1817, Young encontra uma explicação¹⁰. Sugere que as ondas de luz deveriam conter uma vibração transversal à direção de propagação:

Tenho refletido sobre a possibilidade de dar uma explicação imperfeita do problema da luz que constitui a polarização, sem partir da doutrina genuína de ondulações. Há um princípio nessa teoria segundo o qual todas as ondulações são simplesmente propagadas através de espaços homogêneos em superfícies esféricas concêntricas do tipo das ondas sonoras, consistindo apenas de movimentos diretos e retrógrados das partículas na direção dos raios, com condensações e rarefações concomitantes (isto é, ondas longitudinais). Além disso, é possível explicar nessa teoria uma vibração transversal, propagando-se também na direção do raio, com igual velocidade, mas o movimento das partículas ocorrendo em uma certa direção constante em relação ao raio. Isso é uma polarização. (YOUNG, apud SILVA, 2007, p.155).

Segundo Silva (2007, p.155), antes dessa proposição, a teoria ondulatória concebia a luz como uma onda longitudinal, como o som. Veja que ele mostrou a hipótese de a luz ser composta de ondas transversais como uma nova ideia e um caso particular. Os sólidos propagam o som tanto com ondas longitudinais quanto com ondas transversais, mas os fluidos, como o ar (e, conseqüentemente, o éter, já que este seria um fluido muito mais tênue que o ar), não podem fazer isso, já que não são susceptíveis a forças de cisalhamento. Propor que o éter – fluido – possa propagar uma onda transversal foi realmente de grande ousadia. E essa proposta foi defendida por Fresnel (1788-1827), que entendeu que assim se poderia explicar todo o comportamento conhecido da luz, inclusive os efeitos observados nos cristais.

Foi Fresnel quem primeiro fundamentou matematicamente o trabalho de investigação científica sobre a natureza ondulatória da luz, afastando-se das analogias com a acústica e das

¹⁰ Cabe aqui uma observação sobre a posição de Young, que pode nos ser útil: apesar de haver experimentos que colocavam sua teoria em situação difícil, Young não a abandonou, mas antes, procurou adaptá-la. Vejam que essa atitude é contrária à visão ingênua sobre Ciência que muitas vezes é imposta aos alunos. Visão essa que os faz acreditar que um experimento poderia vir a ser “a prova” ou “a fonte” de uma teoria, coisa que segundo Silva e Martins (2003), seria uma impossibilidade filosófica. Em suas palavras:

Professores de Física (mesmo do nível universitário) algumas vezes não entendem a natureza da Ciência. Ainda há uma crença muito difundida em um modelo indutivista de pesquisa científica (Abimbola, 1983; Hodson, 1985), que já foi rejeitado pelos filósofos da ciência recentes. Professores que não têm interesse e nem formação em História e Filosofia da Ciência, usualmente transmitem uma visão distorcida da pesquisa científica para seus estudantes (Matthews, 1988). Eles tentam mostrar como se obtém uma teoria a partir da observação e experimentos ou como se pode provar uma teoria – apesar da impossibilidade filosófica de ambas as tentativas. (SILVA E MARTINS, 2003, p.54).

considerações qualitativas de Young. Combinando o princípio da interferência proposto por Young com o princípio de Huygens para a construção das frentes de ondas, ele explicou matematicamente uma série de experiências sobre a difração da luz em obstáculos, extremidades finas de objetos e aberturas em anteparos. Tal combinação ficou conhecida como o princípio de Huygens-Fresnel. “Para Fresnel, segundo esse princípio, a amplitude da onda luminosa que passa através de uma abertura (ou é interceptada por um obstáculo) em um determinado ponto de um anteparo é a soma (interferência) de todas as ondas secundárias oriundas da abertura (ou do obstáculo).” (BASSALO, 1988, p.80).

Nessa época (início do século XIX) havia uma grande polêmica entre as teorias ondulatória e corpuscular para a natureza da luz. Na esperança de que a teoria corpuscular sobrepujasse definitivamente a teoria ondulatória, a Academia Francesa de Ciências escolheu, como tema para premiação em 1818, a difração da luz. Então Fresnel concorreu a esse prêmio com a sua teoria matemática para a difração, e aconteceu algo inusitado: Poisson, um dos membros do comitê de julgamento (e partidário da teoria corpuscular de Newton), mostrou, usando o cálculo, que se a teoria de Fresnel estivesse correta deveria existir um ponto brilhante no centro da sombra de um pequeno obstáculo circular, o que, pelo senso comum, seria um absurdo¹¹. Um dispositivo experimental foi então montado para que se pudesse verificar tal previsão, e como resultado pôde-se observar o tal ponto brilhante. Assim, Fresnel ganhou o prêmio de 1818, já que não havia mais dúvidas sobre a teoria ondulatória da luz. (BASSALO, 1989, p.43)

Mais tarde – convém repetir aqui o que já dissemos à página 27 – em 1850, medidas da velocidade da luz em diferentes meios apresentaram resultados favoráveis à teoria ondulatória da luz, já que mostraram que esta se apresenta com velocidade menor em meios mais densos, condição oposta à imposta pela teoria corpuscular Newtoniana.

De acordo com Bassalo (1989, p.44), Fresnel e Arago se interessaram pela dupla-refração – descoberta por Bartholinus em 1669 – e tentaram interferir os raios ordinário e extraordinário – polarizados em planos perpendiculares – decorrentes da dupla refração, mas não obtiveram sucesso. Informado por Arago sobre esse experimento, Young tenta explicar os fenômenos relativos à dupla-refração através da hipótese de que a luz seria uma onda transversal. Essa ideia foi a chave para Fresnel explicar por que os raios ordinário e extraordinário não interferiam: Eles vibravam transversalmente e em direções perpendiculares.

¹¹ O que ele não sabia era que esse fenômeno já havia sido observado antes, em 1723, pelo astrônomo e matemático Giacomo F. Maraldi. (CARUSO e OGURI, 2006, p.149)

A ideia da transversalidade da onda luminosa de Young e Fresnel fez surgir a hipótese (proposta por Fresnel) de que o éter – meio onde se propagaria a onda luminosa – deveria se comportar como um sólido elástico. Tal hipótese esbarrava numa clara dificuldade: Se o éter se comporta como um sólido elástico, como podem os planetas se movimentar através dele sem sofrer modificações em suas órbitas? Diversos modelos e teorias (mecânicas) foram criados para tentar explicar o funcionamento do éter, mas não se conseguiu criar uma teoria que não violasse as leis da Mecânica (ver Bassalo, 1989, p. 47-49). Apesar disso, a teoria do éter luminífero persistiu durante muito tempo, tendo sido aperfeiçoada por diversos cientistas, entre eles Carl Neumann (1832-1925), Lord Rayleigh (1824-1908), Kirchhoff (1824-1887) e Lord Kelvin (1824-1907). Mas nunca deixou de existir conflitos entre a ideia da existência do éter e as leis da Mecânica.

Deve ficar claro, entretanto, que apesar das diferentes concepções sobre o espaço físico e a luz (aceitação ou não do vácuo ou do éter), Newton, Huygens, Young, Fresnel e outros, estavam de acordo sobre um aspecto da explicação da propagação da luz: Ela deveria partir de um modelo mecânico, ou seja, inexistia em suas mentes qualquer coisa parecida com o modelo hodierno para a natureza da luz.

Quando Maxwell (1831-1879) demonstrou, em 1865, que a luz era uma onda eletromagnética, a ideia do éter luminífero foi reforçada, pois considerava-se tal meio como suporte para a propagação dessa onda. Tal ideia ficou muito abalada quando da divulgação dos resultados das experiências realizadas por Michelson e Morley, em 1887. Utilizando o interferômetro, tais experiências mostraram que a existência do éter não era compatível com a ciência existente à época, baseada na mecânica newtoniana e em seu princípio básico, o princípio da Relatividade de Galileu. Albert Einstein (1879-1955) sequer considerou o éter em sua Relatividade Restrita e nem em seu trabalho sobre o efeito fotoelétrico. Para ele, a luz não é uma onda eletromagnética, mas um pacote de energia que possui características ondulatórias (λ) e corpusculares (p), características estas ligadas pela relação $p = h / \lambda$ (onde h é a constante de Planck). (Bassalo, 1989, p. 49).

Terminaremos aqui este capítulo, mas não sem antes deixar ao leitor uma pequena reflexão sobre o que é a verdade em ciência. Para isso, vamos citar Bassalo (1989, p.49) mais uma vez: “Convém salientar que uma nova ideia de éter vem sendo hoje considerada nas chamadas Teorias da Relatividade Extendida.”

Vê-se, então, que a ciência não pode ser tida como um modelo enclausurado, rígido. Suas verdades podem ser modificadas com novas descobertas e novo entendimento dos fenômenos. E isso é o que devemos ensinar aos nossos alunos, para que eles possam

compreender que a ciência não é uma coisa que simplesmente existe, mas que é fruto da mente humana, e que está sempre em construção.

5 Proposta para o Nível Médio

5.1 Apresentação

Trazer soluções para todos os problemas levantados até aqui seria uma tarefa extremamente difícil, que extrapolaria as aspirações – e a capacidade de pesquisa – do autor de um trabalho final de um curso de graduação. Entretanto, pode-se fazer um plano de aula que, não resolvendo¹² o problema da dicotomia existente hoje entre o ensino dos conteúdos programáticos de ciência – em nosso caso, Física – e o ensino sobre a ciência, poderia ser útil na construção de uma “nova” visão de ciência para os alunos, diferente da que eles conheceriam até então. As aspas se justificam pois a visão sobre ciência que se deseja mostrar não é diferente da realidade: uma construção do intelecto humano eternamente inacabada, sempre admitindo aperfeiçoamentos.

O plano de aula será aplicado ao final do terceiro ano do Ensino Médio, ministrado junto ao tema *Ondas* (no tópico *natureza ondulatória da luz*), de maneira a fazer conexão com o tema *Ótica*, observado no primeiro ano. Assim, os alunos já deverão estar familiarizados com os fenômenos ondulatórios, como o princípio da superposição¹³, interferência, reflexão, refração e difração (ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2006, p.24-28). Seu assunto será o desenvolvimento da teoria ondulatória da luz, mostrado através do texto contido no capítulo 4 deste trabalho. O texto foi redigido com a intenção de mostrar que diversas pessoas contribuem – seja apoiando ou criticando – para a formulação das teorias científicas, e que esse processo é permeado, não raro, por verdadeiras disputas. Tal intenção tornou o texto um tanto longo, mas acreditamos que os estudantes, ao final do Nível Médio, já possuam maturidade para superar tal dificuldade. Serão também mostrados alguns experimentos, que tenham algum relacionamento com o desenvolvimento histórico da teoria ondulatória da luz, como um experimento sobre interferência onde usaremos orifícios circulares ao invés de fendas. Nosso interesse aqui não é necessariamente introduzir os tópicos interferência e difração da luz (embora eles sejam abordados durante a aula), mas sim tentar mostrar o que é e como ocorre o desenvolvimento científico, partindo do desenvolvimento histórico da teoria ondulatória da luz. Para efeito desse trabalho, acataremos às disposições contidas no

12 Um único plano de aula não seria suficiente para resolver tal problema, que está relacionado também à maneira como o ensino de ciência tem sido tratado pela legislação, o que nos remete novamente à reflexão sugerida na nota de rodapé n. 2.

13 Esse princípio não se aplica somente a ondas, e afirma que “A superposição das causas é igual à superposição dos efeitos”. Tal princípio pode ser aplicado a qualquer sistema linear, facilitando sua resolução, já que se pode estudar o efeito de cada causa em separado, e em seguida simplesmente somar os efeitos. A título de ilustração, em dinâmica, esse princípio seria enunciado assim: “O efeito de um conjunto de forças atuando simultaneamente em um corpo é igual à soma dos efeitos de cada força atuando isoladamente.”

documento “Reorientação Curricular – Física”, citado acima, e não avançaremos em direção à Física Moderna.

5.2 Plano de aula

5.2.1 Objetivos

- Caracterizar a Física (e as ciências em geral) como um processo humano de entendimento e explicação da natureza, através da história do desenvolvimento do modelo ondulatório da natureza da luz.
- Facilitar a compreensão da evolução do modelo ondulatório da luz.
- Facilitar a compreensão da óptica física, em termos qualitativos.
- Enfraquecer as ideias distorcidas sobre a ciência, como as ligadas à tradição empírico-indutivista, tais como:
 - O conhecimento científico considerado como acabado;
 - O uso unicamente de experimentos como redescoberta de uma lei ou teoria;
 - O conhecimento científico como simples cópia da realidade;

5.2.2 Preparação

Na aula anterior os alunos deverão responder ao seguinte questionário, de maneira que possamos avaliar os seus conhecimentos prévios.

Questionário de pré-avaliação

1 – Em suas experiências, Young chegou à conclusão que a luz:

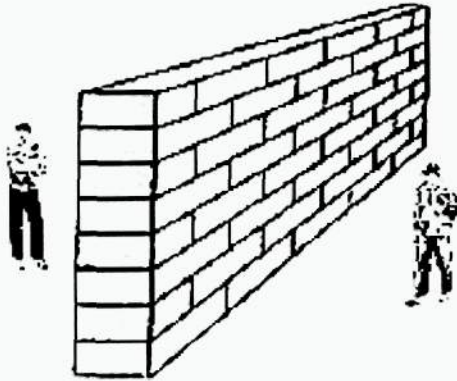
- a) Possui comportamento ondulatório.
- b) Possui comportamento de partícula.
- c) Não sofre interferência.
- d) É uma onda longitudinal.

2 – As ideias de Huygens sobre a luz estavam de acordo com a teoria corpuscular?

3 – De acordo com Huygens, o que é a luz? E como ela se propaga?

4 – As ondas de rádio ao contornarem um prédio, sofrem uma difração mais acentuada do que as ondas de TV. Qual dessas duas ondas tem maior comprimento de onda?

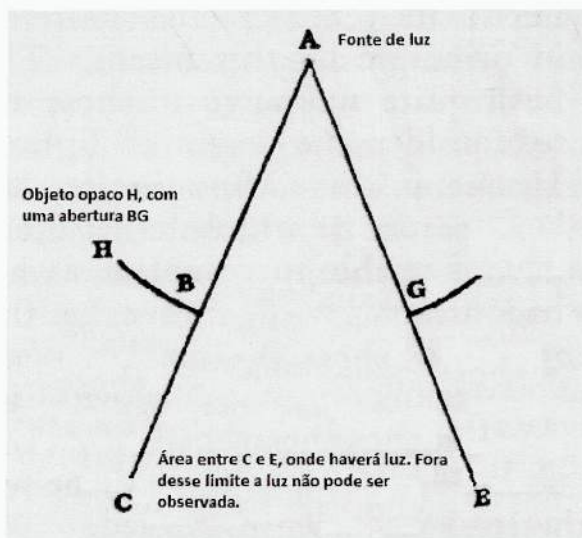
5 – Um muro espesso separa duas pessoas que conversam, elas não se veem, mas se escutam claramente uma à outra.



a) O que explica o fato de as pessoas se ouvirem?

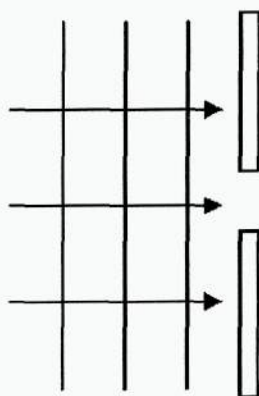
b) O que explica o fato de as pessoas não se verem?

6 – É correta a argumentação de Huygens, onde ele afirma que por menor que seja a abertura atravessada pela luz, ela sempre se encontrará entre duas linhas retas? Por quê?



7 – Explique em que situações podem ocorrer a interferência construtiva e a interferência destrutiva.

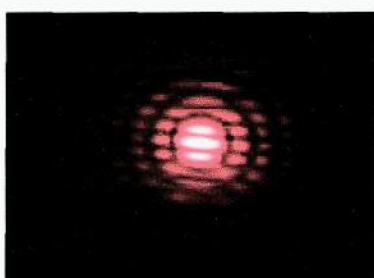
8 – O esquema abaixo representa um feixe luminoso de raios paralelos incidindo sobre um obstáculo no qual existe uma fenda de largura comparável ao comprimento de onda da luz. As linhas verticais representam as cristas de onda que podemos considerar como frentes de ondas e as setas que indicam o sentido da propagação representam os raios.



a) Desenhe na figura ao lado, as frentes de ondas e os raios após passar pela fenda.

b) Caso o comprimento de onda fosse reduzido para um quarto do comprimento de onda mostrado na figura, explique como as frentes de onda após a passagem pela fenda se modificam comparadas com o caso anterior.

9 – A figura abaixo foi gerada por um aparato experimental utilizando um laser e um anteparo contendo dois orifícios circulares. Identifique os efeitos de difração e os de interferência. A que se deve cada um deles? E o que pode ser inferido sobre a disposição dos orifícios no anteparo?



Esse questionário também servirá para avaliar a eficácia da aula, já que será novamente aplicado ao final do processo.

Após entregar o questionário de pré-avaliação respondido, os alunos receberão o texto que introduzirá o tema a ser discutido na aula seguinte.

5.2.3 Durante a aula

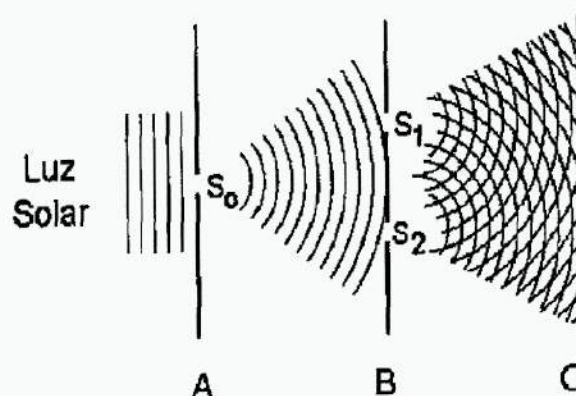
Inicia-se a aula com uma conversa sobre o texto, lembrando alguns de seus pontos principais, bem como falando um pouco sobre Young e suas palestras públicas, onde ele versa sobre os resultados de seu experimento de interferência. Atenta-se para o fato de que, à época,

Newton era tido como um herói nacional (SILVA, 2009, p.283), e que provavelmente tal fato teria levado Young a iniciar sua palestra falando sobre o fenômeno de interferência em ondas de água e som, que já eram plenamente aceitos à época, e em seguida fazer analogias com a luz. Na palestra pública, ele nem mesmo descreve seu aparato experimental, o que levou algumas pessoas a (recentemente) levantar dúvidas sobre seu experimento, dentre elas, Silva (2009). Nossa intenção é tentar enfraquecer as visões distorcidas ou equivocadas sobre a história da ciência, como aquelas onde Newton é retratado como um grande gênio da óptica, minimizando a importância de outros personagens da história; ou aquelas onde Young é mostrado como a pessoa que descobriu a difração; ou, ainda, aquelas que mostram o experimento de Young como comprovação da teoria ondulatória de Huygens. Acreditamos que utilizando textos de fontes primárias ou secundárias, organizadas de maneira a mostrar o panorama científico da época, facilitaremos a compreensão sobre o desenvolvimento do conhecimento científico, e formaremos cidadãos capazes de discutir sobre sua natureza.

Durante a aula, será enfatizado que disputas e colaborações na formação do saber científico não se restringem ao campo da óptica, mas que todo o conhecimento é construído dessa maneira. Assim, esperamos incentivá-los a estudar sobre outros assuntos (buscando sua origem), não somente os relacionados à Física.

Obviamente os experimentos fazem parte da discussão científica, e eles serão também discutidos em sala de aula, mas com o cuidado de não mostra-los como “prova” de uma teoria, mas como o que realmente são: argumentos a seu favor. E nesse intento, pelo menos um experimento deverá ser mostrado aos alunos: o experimento de interferência atribuído a Young. Uma discussão matemática do experimento pode ser feita ou não. Esse aspecto não é o que mais nos interessa nessa aula. Ao final da aula, um questionário contendo as mesmas questões da pré-avaliação será aplicado para verificar o que mudou na estrutura cognitiva dos alunos, em relação a esse assunto.

5.2.4 O experimento



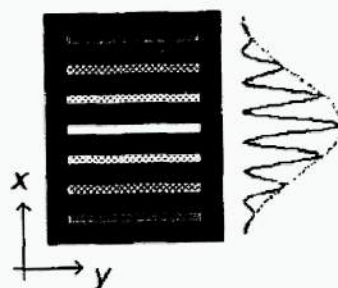
Montagem de Young com luz solar. S_0 , S_1 e S_2 são orifícios circulares com diâmetro a . Os orifícios S_1 e S_2 estão separados por uma distância d .

A figura acima mostra um esquema do experimento de Young. Cada orifício funciona como uma fonte puntiforme de ondas esféricas secundárias. A luz difratada nos orifícios S_1 e S_2 se dispersará na região entre o anteparo B e a tela de observação C, se superpondo e interferindo construtiva ou destrutivamente. Na tela C, visualizar-se-á o padrão de interferência luminosa, que se caracteriza por uma figura de intensidade luminosa variável onde mesclam-se alternadamente zonas de maior intensidade com zonas de menor intensidade luminosa. Daqui por diante passaremos a nos referir somente às zonas com intensidade máxima, que denominaremos *zonas claras*, e às zonas com intensidade mínima, que denominaremos *zonas escuras*. Evidentemente, entre as zonas claras e escuras existem intensidades luminosas intermediárias, mas elas não nos interessam nesse momento.

Em nosso experimento utilizaremos orifícios circulares, e não fendas, que é a configuração frequentemente adotada.

Cabe aqui uma breve discussão sobre a configuração de fendas, que possui a vantagem de facilitar a análise quantitativa da distribuição da intensidade da luz na tela de observação, pois a simetria cilíndrica das ondas secundárias emitidas pelas fendas faz com que a intensidade das zonas iluminadas não sofra variação apreciável ao longo da direção y , assim, o resultado da superposição das frentes de onda no anteparo C é analisado pelo professor, que separa os efeitos de interferência dos de difração, classificando àqueles como o resultado da superposição das ondas emanadas das duas fendas, afastadas por uma distância d . Já os efeitos de difração são caracterizados como os decorrentes da superposição das ondas oriundas de cada ponto da abertura a de uma mesma fenda. O professor normalmente conclui afirmando que a densidade das zonas claras ao longo da direção x é função da distância d entre as fendas,

enquanto a modulação da intensidade das zonas claras na direção x depende da largura a das fendas.



Distribuição da intensidade luminosa das franjas retangulares produzidas pelo arranjo experimental utilizando-se fendas. A envoltória representa a modulação na intensidade das franjas, resultante da difração. A figura mostra as franjas de interferência limitadas entre os mínimos adjacentes ao máximo central da envoltória resultante da difração.

Tanto no caso de interferência quanto no caso de difração, a superposição resulta em uma interferência, que poderá ser construtiva, destrutiva ou uma situação intermediária (que não foi representada na figura acima, para simplificá-la). A diferença de percurso Δr (que determina a diferença de fase) entre as ondas que se superpõem num determinado ponto P determinará se teremos, nesse ponto do anteparo, uma zona clara ou escura.

Além de utilizar fendas, costuma-se também fazer o experimento utilizando uma fonte de luz monocromática distante ou colocada no foco de uma lente convergente, para que se possa obter frentes de ondas planas, que são apresentadas, juntamente com as fontes monocromáticas, como condições necessárias para se ter uma figura de interferência luminosa, o que não é verdadeiro¹⁴. Além disso, não é fácil para os alunos diferenciar, na figura vista no anteparo, o efeito de interferência do efeito de difração, já que não se vê facilmente que parte da figura foi gerada por uma única fenda, ou pela interação de diferentes fendas. Tal diferenciação é importante, e cremos que pode ser facilitada ao se trocar a geometria retangular da configuração de difração e das franjas de interferência – geometria essa gerada pelas fendas – por uma geometria circular, utilizando-se orifícios.

É o que fazemos em nosso experimento. Com isso, tornamos a descrição matemática mais complicada, mas nosso interesse é verificar qualitativamente os padrões da figura de interferência em função do formato circular dos orifícios difratores e de seu afastamento linear. Dessa maneira conseguiremos distinguir mais facilmente os efeitos de interferência dos de difração.

¹⁴ Não é o assunto da aula que estamos tratando aqui, mas pode-se utilizar o experimento para falar sobre coerência. Não aplicaremos em nossa aula, mas abordaremos o assunto no subitem 5.3.6 deste trabalho, como sugestão para uma possível aplicação.

5.2.5 Montagem

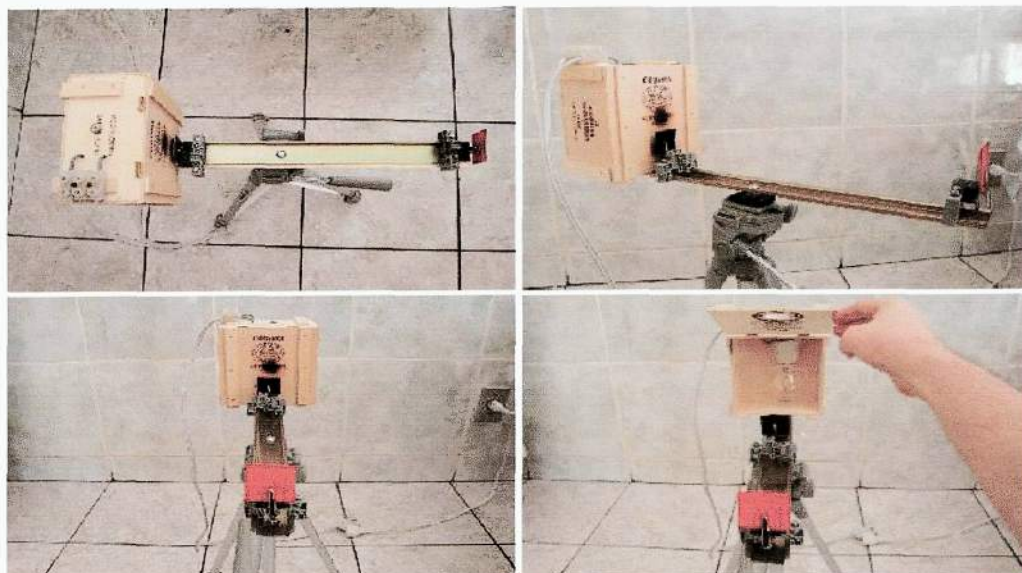
Os anteparos com os orifícios foram confeccionados utilizando-se o alumínio das paredes de latas de refrigerante. Esse alumínio pode ser cortado sem dificuldade utilizando-se uma tesoura comum. Para facilitar o manuseio deve-se corta-lo em forma de pequenos quadrados (de mais ou menos 2,5 x 2,5 cm), e cobrir suas bordas com fita isolante, para evitar que se corte as mãos nas lâminas. Fazer os orifícios com a ponta de uma agulha bem fina, apoiando as lâminas numa superfície lisa e firme. Deve-se pressionar a ponta da agulha girando-a simultaneamente, para obter orifícios circulares. Para variar o tamanho dos furos, pressionar a ponta da agulha sobre as lâminas com maior ou menor intensidade.

Foram montadas várias lâminas, com diferentes tamanhos de orifício, e escolheu-se as que obtiveram melhores resultados.

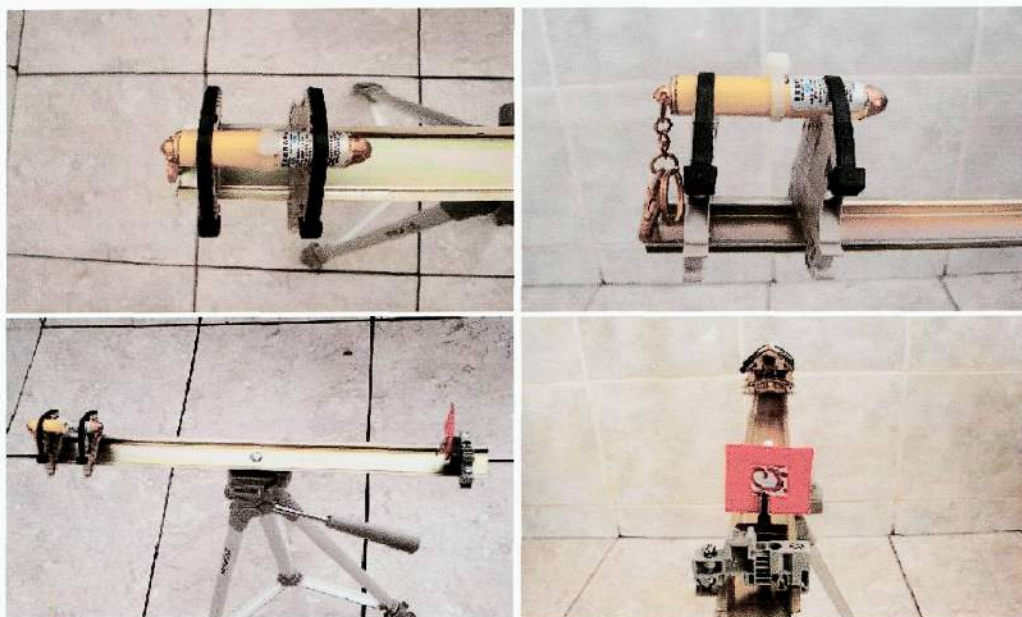


Algumas das lâminas confeccionadas. As cobertas com fita preta contêm um orifício; as cobertas com fita vermelha possuem dois orifícios.

Os anteparos são dispostos como na montagem clássica de Young. Como fonte luminosa utilizamos uma caixa de madeira contendo uma lâmpada de 60W (o experimento foi montado também com um “laser point” como fonte luminosa).



Montagem do experimento utilizando como fonte luminosa uma caixa de madeira contendo uma lâmpada de 60W (luz não monocromática nem tão pouco coerente para o sensor utilizado – o olho humano).



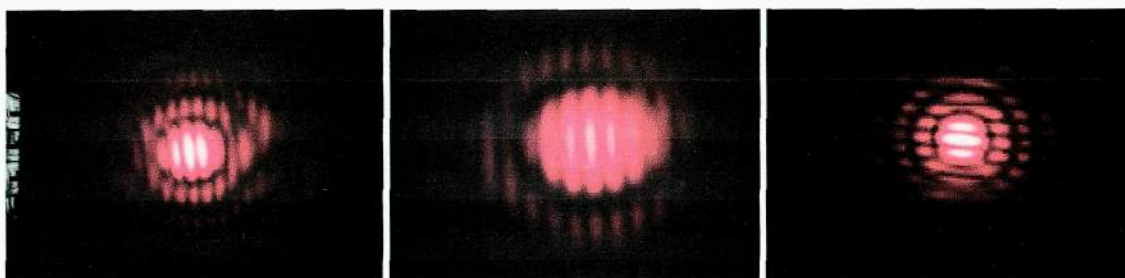
Montagem do experimento utilizando como fonte luminosa um “laserpoint” – Nessa configuração não é necessária a utilização do anteparo com um único orifício, pois a fonte de luz utilizada é coerente o suficiente.

O anteparo *A* contendo um orifício deve ser colocado no suporte mais próximo à fonte luminosa. O anteparo *B*, contendo dois orifícios, deverá ser colocado mais adiante, alinhado com o anteparo *A*. Utilizaremos a retina do observador como tela de projeção *C* (***nunca com o laser. Jamais permita que alguém projete um feixe laser diretamente sobre os olhos***). Assim, o anteparo contendo dois orifícios deverá ser colocado bem próximo ao olho, para que o cristalino focalize na retina os raios luminosos incidentes

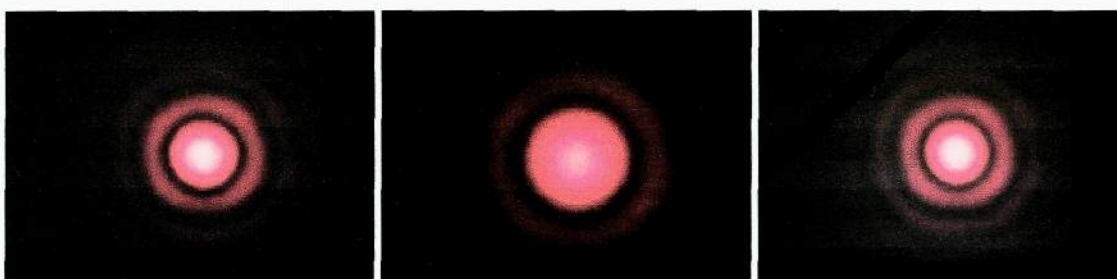


Uma pessoa observando a figura de interferência.

As figuras seguintes mostram a figura visualizada no experimento. As franjas de interferência aparecerão perpendiculares à linha que une os centros dos orifícios. A configuração de difração, nessa montagem, é constituída de anéis claros e escuros. Para uma melhor visualização do efeito de difração, pode-se substituir o anteparo contendo dois orifícios por um contendo somente um. Dessa maneira teremos somente a configuração de difração.



Fotografias das projeções. Nas duas primeiras fotografias pode-se ver as franjas de interferência na vertical. Na terceira as franjas estão na horizontal, pois o anteparo contendo dois orifícios sofreu uma rotação de 90°. A configuração de difração pode ser visualizada em todas as figuras, e é composta por anéis claros e escuros.



Fotografias das projeções contendo somente a configuração de difração. O anteparo contendo dois orifícios foi substituído por um contendo apenas um (foi utilizado um "laserpoint" para produzir todas as figuras fotografadas).

Anteparos contendo orifícios com d diferentes terão maior ou menor densidade de franjas de interferência dentro da configuração de difração. Quanto maior for d , menor será a densidade de franjas.

É interessante fazer com que os alunos reflitam sobre as imagens resultantes das diversas configurações possíveis, a saber: variando-se d (onde teremos variação da densidade de franjas de interferência, além da superposição com a configuração de difração); e substituindo-se o anteparo com dois orifícios por um anteparo com somente um orifício (onde se teria somente a configuração de difração).

Para melhor aproveitar a configuração com orifícios circulares, sugerimos girar o anteparo contendo dois orifícios em torno do eixo determinado pela direção da luz. Assim, observar-se-á a rotação das franjas de interferência no interior da configuração de difração, o que facilita a diferenciação visual entre os efeitos de interferência (devidos à presença de dois orifícios) e de difração (devidos à forma circular dos orifícios). Note que tal resultado não se pode observar na montagem experimental utilizando-se fendas.

5.2.6 A coerência

Para que se veja uma distribuição estável de franjas claras e escuras no anteparo C , é necessário que a diferença de fase ϕ entre as ondas oriundas dos orifícios S_1 e S_2 seja constante no tempo.

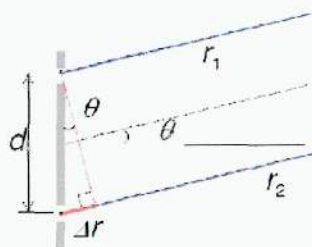
As ondas luminosas vindas de S_1 e S_2 devem pertencer à mesma frente de onda que chegou simultaneamente a ambos orifícios. Assim os orifícios se comportam como fontes coerentes. Para cumprir essa condição ao se utilizar de uma fonte não coerente – como uma lâmpada incandescente, ou o sol – utiliza-se o anteparo A , com o orifício S_0 . O orifício S_0 faz com que qualquer variação de fase na luz que incide sobre ele seja transmitida simultaneamente aos orifícios S_1 e S_2 , assim, as ondas luminosas que ali se difratam continuam em fase. Na ausência de S_0 , ou se seu diâmetro é muito grande, tal efeito não se observa, e não há coerência espacial na luz que chega ao anteparo B . Construindo-se um orifício dessa maneira, e o comparando com o orifício menor, poder-se-ia introduzir a ideia de fonte puntiforme, e depois mostrar que essa ideia é uma abstração, já que iluminando-se um orifício com uma abertura finita ϕ , ele poderia funcionar como fonte puntiforme, dependendo para isso simultaneamente de três fatores: seu diâmetro ϕ , seu afastamento r ao anteparo B , e do comprimento de onda λ . Normalmente se faz $\phi \ll r$ e $\lambda \leq \phi$.

Com uma fonte não puntiforme (orifício S_0 muito grande), a luz que se propaga através dos orifícios S_1 e S_2 gerará, no anteparo C , uma figura onde o contraste entre as franjas claras e as escuras será muito pequeno. Nessa situação a diferença de fase ϕ entre os raios de luz provenientes daqueles orifícios não se mantém constante no tempo. Cada valor

instantâneo de ϕ gerará uma figura de interferência correspondente. Dessa maneira, para um determinado ponto P sobre o anteparo C , variando-se o valor de ϕ , poderá existir um máximo, um mínimo, ou um valor de intensidade intermediário. Como a variação de ϕ ocorre muito rapidamente, o olho humano tende a perceber uma iluminação média uniforme naquele ponto. Pode-se mostrar aos alunos que um orifício grande pode se transformar numa fonte puntiforme, fazendo sua distância r em relação ao anteparo B muito maior que seu diâmetro ϕ , o que fará com que as frentes de ondas que chegam aos dois orifícios em B sejam praticamente planas. Isso pode ser mostrado aos alunos pedindo que eles afastem gradativamente o anteparo B – aumentando r – do anteparo A , até que tornem a ver a figura de interferência, fazendo-se novamente $\phi \ll r$, situação que se aproxima novamente à de uma fonte puntiforme.

Existe também a coerência associada ao grau de monocromaticidade da fonte luminosa. Ao trabalhar com luz branca, que contém todos os λ visíveis, também se pode observar figuras de interferência, pois todas as ondas de comprimentos de onda diferentes passam simultaneamente pelos orifícios do anteparo B , e então se observa no anteparo C (em nosso caso, a retina do observador) o efeito resultante da superposição das figuras de interferência relacionadas a cada λ presente na luz. Observando-se mais detalhadamente a figura de interferência gerada, pode-se ver que as bordas das franjas claras são coloridas, o que mostra que a posição dos máximos e mínimos de intensidade depende de λ (pode haver, num determinado ponto P no anteparo C , um máximo para λ e um mínimo para λ' – sendo $\lambda \neq \lambda'$). Assim, o contraste entre duas franjas claras adjacentes, geradas por um mesmo λ , é menor em relação à situação em que se utiliza luz monocromática. Além disso, ao se trabalhar com luz branca a visibilidade das franjas claras é diminuída, especialmente quando se considera a região mais afastada do máximo central, tornando menor o número de franjas claras que podem ser visualizadas.

Deve-se ter em mente ainda que a condição de coerência entre S_1 e S_2 , devida ao tamanho de S_0 , não garante a visualização de uma figura de interferência estável em C . É preciso assegurar também que a diferença Δr ($\Delta r = r_2 - r_1$) entre as distâncias percorridas pela luz oriunda de cada orifício seja menor ou igual ao comprimento de coerência l_c das ondas que partem desses orifícios e se superpõem em C .



Para grandes distâncias (onde $D \gg d$), os raios de luz são praticamente paralelos, então $\Delta r = r_2 - r_1$ é um cateto do triângulo retângulo que tem d como hipotenusa, e θ como ângulo contraposto a esse cateto.

Tempo de coerência t_c é o tempo durante o qual a onda mantém sua fase inicial e seu estado de polarização. A distância percorrida pela onda neste intervalo de tempo é chamada de comprimento de coerência l_c .

O efeito de coerência temporal pode ser ilustrado no experimento de Young (realizado com a lâmpada incandescente) utilizando-se uma lamínula de microscópio, que possui uma espessura de 0,2mm. Deve-se segurar a lamínula apoiada sobre a face plana do anteparo que contém os orifícios S_1 e S_2 e, durante a observação da figura de interferência, deve-se deslocar a lamínula, de maneira que ela cubra um dos orifícios. Nesse momento se verificará que as franjas de interferência deixam de ser visualizadas no ponto de observação, mas a configuração de difração lá permanece. Deslocando mais um pouco a lamínula, de maneira que cubra os dois orifícios, verificar-se-á que as franjas de interferência voltam a ser visualizadas.

As franjas de interferência deixam de ser visualizadas no ponto de observação devido ao atraso sofrido pelo trem de ondas que atravessa o vidro (lembrar aos alunos que quanto mais denso o meio, mais lentamente se desloca a luz). Assim, devido a esse atraso, que é maior do que o tempo de coerência t_c , não há mais a situação onde dois trens de ondas que emergem de S_1 e S_2 se encontram no ponto de observação P do anteparo C (que é a retina do observador), mas nesse ponto agora se sobrepõem trens de ondas não correlacionados.

Tal efeito se dá, segundo Nussenzveig (1998, p.75), devido a fonte de luz usada, um filamento incandescente, ser formada por um grande número de fontes microscópicas, independentes e não correlacionadas, atuando cada uma durante um intervalo de tempo muito pequeno (da ordem de 10^{-8} s) e, quando volta a atuar, sua fase não guarda relação alguma com a fase de oscilação anterior. Assim, mesmo considerando uma única fonte microscópica do filamento, e fazendo a luz emitida passar por um filtro que a torne o mais monocromática possível, essa luz não oscilaria no tempo como uma senoide ininterrupta. Mas poderíamos representá-la como uma sucessão de trens de onda senoidais finitos, cada um com duração

média a um processo de emissão, com as fases iniciais de cada um deles variando ao acaso. E trens de onda diferentes não interferem, pois suas defasagens variam ao acaso.

6 Conclusão

Após a aula, uma avaliação será realizada através da aplicação de um questionário contendo as mesmas questões do questionário de pré-avaliação. Assim pode-se verificar se foram obtidos os resultados esperados. Tal avaliação servirá também como parâmetro para melhorar o procedimento.

Como se pôde perceber ao longo do texto, este trabalho tem um forte viés de conscientização. Esperamos que os profissionais do ensino (especialmente os do Nível Médio) que venham a lê-lo passem a considerar com mais seriedade a aplicação de técnicas que levem os alunos a compreender a evolução dos tópicos abordados, sem a preocupação meramente burocrática de “apresentar todo o conteúdo”. Acreditamos que compreendendo melhor sua evolução, os alunos compreenderão melhor também os tópicos em si, e não teríamos mais a situação onde os alunos são capazes de medir o diâmetro de um fio de cabelo se utilizando de um laser, mas não são capazes de explicar por que as ondas de rádio, ao contornarem um prédio, sofrem uma difração mais acentuada do que as ondas de TV.

Temos consciência de que agindo assim os professores não serão realmente capazes de contemplar todos os temas preconizados pelo currículo (novamente voltamos à nota de rodapé nº 2), mas apesar disso, acreditamos que dessa maneira o processo se daria com maior eficiência, o que faria com que esse “tempo perdido” se transformasse em lucro quando os alunos passassem a se interessar por ciência – que, os leitores deste trabalho não de concordar, é um assunto apaixonante. Esse interesse, se corretamente aplicado faria com que os estudantes se tornassem cidadãos capazes de discutir, se informar e – principalmente – decidir sobre ciência. E isso é o que realmente interessa à sociedade: cidadãos capazes de contribuir com o seu aperfeiçoamento, seja no campo humano, seja na área científica.

REFERÊNCIAS

- BASSALO, J. M. F. A crônica da óptica clássica. (Parte II: 1665-1803) Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 4, n. 3, 1987, p. 140-150.
- BASSALO, J. M. F. Fresnel: O formulador matemático da teoria ondulatória da luz Caderno Brasileiro de ensino de Física, Florianópolis, v. 5, n. 2, 1988, p. 79-83.
- BASSALO, J. M. F. A crônica da óptica clássica. (Parte III: 1801-1905) Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 6, n. 1, 1989, p. 37-58.
- BRASIL. Secretaria de Educação Fundamental. Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/SEF, 2000
- BRASIL. PCN+ Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/index.php?option=content&task=view&id=265&Itemid=255> na data de 08/05/2008.
- BRAUN, L.F.M.; BRAUN, T. A montagem de Young no estudo da interferência, difração e coerência de fontes luminosas. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v.11, n. 3, 1994, p.184-195.
- CARUSO, F.; OGURI, V. **Física Moderna: Origens Clássicas e Fundamentos Quânticos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- CARVALHO, S. H. M. Iluminando o ensino de física através da óptica física – relato sobre a implantação de um projeto de ensino de física no segundo ano do ensino médio. Atas do XV Simpósio Nacional de Ensino de Física, 2003, p. 2644-2653.
- ESTADO DO RIO DE JANEIRO, Secretaria de Estado de Educação. Reorientação Curricular: Livro II - Ciências da Natureza e Matemática. Rio de Janeiro: SEE/RJ & UFRJ, 2006.
- GUERRA, A.; REIS, J. C.; BRAGA, M. Um Julgamento no Ensino Médio – Uma Estratégia para Trabalhar a Ciência sob o Enfoque Histórico-Filosófico. A Física na Escola, v.3, n.1, 2002, p. 8-11.
- HUYGENS, C. e FRESNEL, A. **La Teoría Ondulatoria**. Introdução e notas de Cortés Pla. Buenos Aires: Editorial Losada, 1945.
- MATTHEWS, M. R. História, Filosofia e Ensino de Ciências: A tendência atual de reaproximação. Caderno Catarinense de Ensino de Física, v.12, n.3, 1995, p. 164-214.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica Vol. 2**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1996.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica Vol. 4**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 1998.

PÉREZ, D. G.; MONTORO, I. F.; ALÍS, C. J.; CACHAPUZ, A.; PRAIA, J. Para uma imagem não deformada do trabalho científico. Ciência & Educação, v.7, n.2, p.125-153, 2001

SILVA, B. V. C. Young fez, realmente, o experimento da fenda dupla? Latin-American Journal of Physics Education, v.3, n.2, p.280-287, 2009.

SILVA, C. C.; MARTINS, R. A. A teoria das cores de Newton: Um exemplo do uso da história da ciência em sala de aula. Ciência & Educação, V. 9, n. 1, 2003, p. 53-65.

SILVA, F. W. O. A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos. Revista Brasileira de Ensino de Física, V.29, n1, p.149-159, 2007.

UFRJ. Manual para elaboração e normalização de dissertações e teses. Série Manual de Procedimentos, n. 5, 2004.

VANNUCCHI, A. I. História e Filosofia da Ciência: da teoria para a sala de aula. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física e à Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996, 131f.

VICENZI, S. Difração e Interferência para Professores do Ensino Médio. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007, 159f.

Apêndice 1

Teoria Ondulatória da Luz – Descrição matemática atual

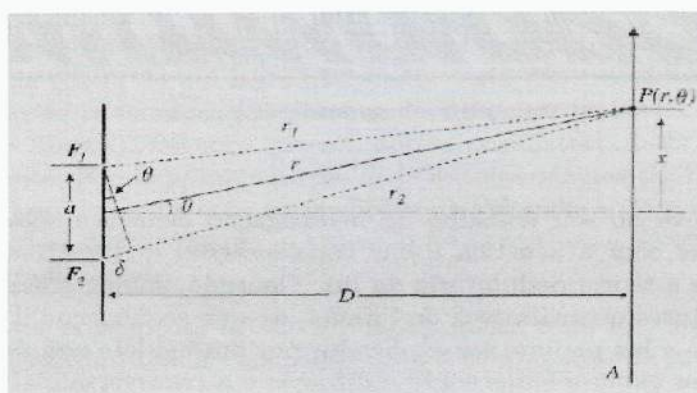
Passaremos agora à descrição matemática dos argumentos de Young e Fresnel, que podem ser apresentados assim (CARUSO e OGURI, 2006, p.150):

Sejam

$$\psi_1 = \psi_0(r_1) \text{sen}(k r_1 - \omega t)$$

$$\psi_2 = \psi_0(r_2) \text{sen}(k r_2 - \omega t)$$

as funções de onda que representam duas perturbações luminosas coerentesⁱ, de amplitudes $\psi_0(r_1)$ e $\psi_0(r_2)$, mesma frequência $\nu = \omega / 2\pi$ e comprimento de onda $\lambda = 2\pi / k$, originadas em duas fendas estreitas e idênticas F_1 e F_2 , separadas uma da outra por uma distância a .



Esquema de interferência de ondas originadas em duas fendas em um anteparo.

Para pontos $P(r, \theta)$ distantes do plano das fendas, ($r, r_1, r_2 \gg a$), as amplitudes e a diferença de marcha entre as duas ondas são dadas, respectivamente, porⁱⁱ

$$\psi_0(r_1) = \psi_0(r_2) = \psi_0(r) \approx \psi_0 \quad (\text{constante})$$

$$\delta = r_2 - r_1 = a \tan(\theta) \approx a \text{sen}(\theta) \approx a \theta$$

A perturbação resultante no anteparo é dada pela superposição linear

$$\psi = \psi_1 + \psi_2$$

- i Duas fontes de ondas quase monocromáticas, originadas em duas fendas, ou as ondas provenientes de duas fontes, são ditas coerentes quando as funções harmônicas que as representam mantêm uma diferença de fase constante, durante o tempo de resolução (τ) de um observador ou de um detector. Por exemplo, para o olho humano, τ é da ordem de 0,1s, enquanto, para um rápido dispositivo eletrônico, τ pode ser da ordem de 10^{-10} s. Assim, duas fontes independentes nas quais as fases variam em 0,01s parecem incoerentes para um observador humano e altamente coerentes para um detector eletrônico.
- ii Essas são as chamadas aproximações de Joseph von Fraunhofer para campos distantes das fontes.

Como as ondas possuem a mesma frequência, a intensidade I observada em um ponto genérico do anteparo (A), a uma distância D do plano das fendas, será proporcional à média temporal do quadrado da função de onda resultante,

$$I \propto \langle \psi^2 \rangle T = \langle (\psi_1 + \psi_2)^2 \rangle$$

uma vez que

$$\begin{aligned} \psi^2 &= (\psi_1 + \psi_2)^2 \\ &= \psi_0^2 \text{sen}^2(kr - \omega t) + \psi_0^2 \text{sen}^2(kr - \omega t + k\delta) + \\ &\quad + 2\psi_0^2 \text{sen}(kr - \omega t) \text{sen}(kr - \omega t + k\delta) \end{aligned}$$

obtem-se

$$I \propto \frac{1}{2} \psi_0^2 + \frac{1}{2} \psi_0^2 + \psi_0^2 \cos k\delta = \psi_0^2 (1 + \cos k\delta)$$

Desse modo, a intensidade da perturbação resultante, ou o padrão de interferência das ondas, apresentará máximos (resultantes de interferências construtivas) e mínimos (resultantes de interferências destrutivas) em pontos tais que, para valores inteiros de n ,

$$k\delta = 2n\pi \quad (\text{máximos})$$

$$k\delta = (2n+1)\pi \quad (\text{mínimos})$$

Como $k = 2\pi/\lambda$, de um modo geral, a interferência construtiva entre duas fontes coerentes, de mesma amplitude e frequência, só ocorrerá em pontos do espaço onde a diferença de marcha entre as ondas seja um múltiplo do comprimento de onda λ , ou seja,

$$\delta = n\lambda \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Escrevendo a diferença de marcha em termos da posição $x \approx D\theta$ ao longo do anteparo A,

$$\delta = \frac{a}{D} x$$

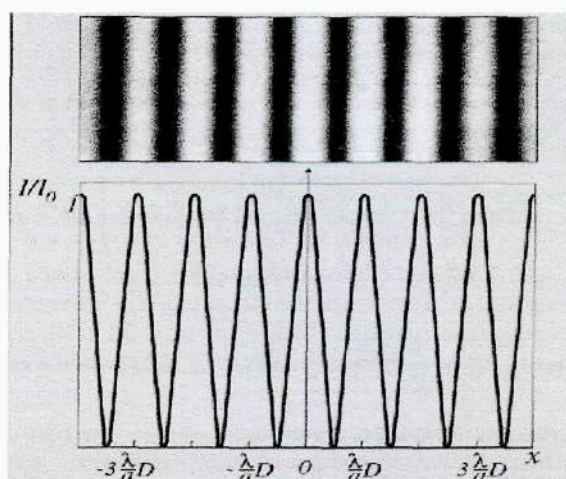
a intensidade I em cada ponto do anteparo será proporcional a

$$\psi_0^2 \left(1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} \frac{a}{D} x \right) \quad \text{ou seja,} \quad I = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{a}{D} x \right)$$

e os máximos estarão nos pontos

$$x_n = n \frac{\lambda}{a} D \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

A figura abaixo mostra os máximos e mínimos resultantes da interferência da luz ao longo do anteparo A; na parte superior, as chamadas franjas de interferência e, na parte inferior, o respectivo gráfico da intensidade relativa.



Na parte superior estão as franjas resultantes da interferência da luz em um anteparo; na parte inferior, apresenta-se a curva da intensidade relativa da onda resultante da interferência ao longo da direção x sobre o anteparo.

Assim, mesmo baseando-se em um modelo mecânico, que considerava as vibrações de um meio etéreo, parecia que o mecanismo de propagação da luz era, definitivamente, ondulatório, pois qualquer modelo corpuscular para a natureza da luz que a considerasse como um feixe de partículas que obedeciam à Mecânica de Newton não conseguia explicar como o movimento de partículas, com mesma velocidade, deslocando-se na mesma direção e sentido, poderia ser neutralizado em algumas regiões do espaço.