

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE FÍSICA

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

ÓPTICA FÍSICA COM O INTERFERÔMETRO

VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER

Simone Kirst Hoffmann

Porto Alegre

2010

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE FÍSICA

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

ÓPTICA FÍSICA COM O INTERFERÔMETRO

VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER¹

Simone Kirst Hoffmann

Dissertação realizada sob a orientação da Profa. Dra. Sandra Denise Prado e apresentada ao Instituto de Física da UFRGS, em preenchimento parcial aos pré-requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Porto Alegre

2010

¹ Trabalho parcialmente financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

SUMÁRIO

Resumo.....	5
<i>Abstract</i>	6
Capítulo 1 – Introdução	7
Capítulo 2 – Estudos Relacionados	12
2.1 – O uso de <i>software</i> educacional como ferramenta para uma aprendizagem significativa	12
2.2 – Utilização do <i>software</i> educacional IMZ como meio facilitador no ensino de fenômenos ondulatórios e como meio de inserção da FMC no Ensino Médio	13
2.3 – A inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) nos currículos do Ensino Médio	18
Capítulo 3 – Referencial Teórico	21
3.1 – Construtivismo.....	21
3.2 – Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel	22
Capítulo 4 – Proposta e Metodologia.....	26
4.1 – A Proposta.....	26
4.2 – Metodologia.....	28
4.2.1 – Aplicação da Metodologia.....	30
Capítulo 5 – Resultados	39
5.1 – Análise do questionário com dados pessoais e profissionais	39
5.2 – Análise do questionário sobre noções básicas de Física Quântica	44
5.3 – Mapas conceituais construídos no primeiro e último encontro	66
Capítulo 6 – Comentários Finais	74
Referências	78
Apêndices	81
Apêndice A – Texto de apoio ao professor de Física I.....	81
Apêndice B – Instruções sobre o <i>software</i> e guias experimentais do IMZ ...	106
Apêndice C – Texto de apoio ao professor de Física II.....	113

Apêndice D – Guias experimentais com respostas	120
Apêndice E – Mapas Conceitual sobre ondas	152
Anexos	153
Anexo A – Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa.....	153
Anexo B – Questionários	167

RESUMO

Este trabalho descreve a utilização de um *software* livre educacional do interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ), em português, como instrumento motivador, ilustrativo, de fácil manuseio e compreensão, para ajudar no ensino e aprendizagem de Física. Salientamos que este *software* educacional foi desenvolvido através de um projeto coordenado pelas professoras Fernanda Ostermann e Flávia Rezende, do Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e foi utilizado como principal instrumento para introduzir conceitos fundamentais de física quântica em uma disciplina do curso Mestrado Profissional de Ensino de Física. No entanto, podemos dizer que esta foi a primeira vez que o IMZ foi aplicado a uma turma de professores não ligados profissionalmente à UFRGS. Em acréscimo ao *software*, foram elaborados e remodelados como produtos educacionais, textos de apoio e guias experimentais que poderão ser usados tanto por professores, como por alunos do Ensino Médio. Fenômenos ondulatórios foi o assunto explorado e um de seus subtemas, a interferência da luz, foi bastante enfatizada. Colocamos à disposição dos professores um material didático de fácil interpretação, podendo, também, ser utilizado com alunos do Ensino Médio. O desenvolvimento desse material tem caráter estratégico para que sirva de base a futuras transposições de temas da física quântica, em particular, o fenômeno da dualidade onda-partícula, para este nível de ensino. Este material de apoio e o *software* compreendem um curso de quarenta horas, para um grupo de seis professores da rede estadual, mais especificamente para os professores que lecionam Física, nas escolas que representam a 6ª Coordenadoria Regional de Educação (6ª CRE), com o apoio da mesma. O curso aconteceu em 2006, na Escola Estadual de Ensino Médio “Ernesto Alves de Oliveira”, em Santa Cruz do Sul, RS. Embasado na Teoria de Aprendizagem Significativa de Ausubel, o material servirá, também, como base ou conhecimento prévio para futuras investidas em outros temas relacionados à física quântica. O conteúdo da teoria ondulatória da luz, trabalhado sobre o aparato do interferômetro virtual de Mach-Zehnder proporcionou a interação entre o conhecimento novo (física quântica e dualidade onda-partícula, desenvolvida sobre o interferômetro virtual de Mach-Zehnder no regime quântico) e o prévio (teoria ondulatória da luz desenvolvida sobre o interferômetro virtual de Mach-Zehnder clássico), possibilitando uma aprendizagem significativa e dando sentido às novas informações. No decorrer do curso, ao analisarmos o comportamento e as atitudes dos professores, pudemos perceber que este assunto não é trabalhado no Ensino Médio, e que eles apresentam dificuldades em relação aos conceitos fundamentais da teoria. Entretanto, parte do grupo mostrou interesse em obter novos conhecimentos, pois em todos os encontros havia questionamentos relacionando novos conceitos com os pré-existentes. Enfim, o *software* gerou visível entusiasmo com as novas possibilidades de aulas “práticas”, com a aprendizagem dos novos conceitos e também a proposta de se avaliar com a utilização de mapas conceituais, estratégia desenvolvida por Novak.

Palavras-chave: Física, física quântica, fenômenos ondulatórios, Ensino Médio, *software* do interferômetro de Mach-Zehnder.

ABSTRACT

In this work it is shown how the utilization of a free educational software can be useful as a motivating and illustrative tool to help the teaching and understanding of fundamental concepts on quantum mechanics. Besides being available also in Portuguese, the virtual Mach-Zehnder Interferometer (MZI) is easy to handle. The software has been developed under a project coordinated by Professor Ostermann (UFRGS) and Professor Rezende (UFRJ) and has been used as a main tool to introduce students from Mestrado Profissional em Ensino de Física to fundamental concepts on quantum physics. Here, it is reported the first time the software was used in an environment that is not university. Concepts of quantum physics were discussed in a 40 hours course given to a group of six secondary level school teachers in 2006. They were teachers working under the 6^a Coordenadoria Regional de Educação (6^a CRE). The course took place in Santa Cruz do Sul (RS) at Escola Estadual de Ensino Médio “Ernesto Alves de Oliveira”. In order to help the students with the software itself and physical concepts that could help the understanding of the simulations results, supporting materials like helping texts and experimental guides were prepared based on Ausubel framework. We were also concerned about an educational product that could also be helpful to secondary level school students. The texts are available in an easy language and straightforward physics. Although the number of students were relatively small, the group was representative in the sense it reproduces the reality of public secondary schools in Brazil. Physics is not, in general, taught by people that are graduated in Licenciatura em Física and the ones that are, are in general, not very well prepared. It was clear that no one in the group had enough confidence “to touch” subjects related to quantum physics in classes having the excuse this is a very difficult topic to overcome. Using optical physics as basis and the virtual MZI, we could see some enthusiasm when the students realize it is possible, for example, to discuss some concepts related to wave-particle duality without unreachable mathematics.

Keywords: *Physics, quantum mechanics, ondulatory phenomenon, secondary level school, software Mach-Zehnder interferometer.*

1 INTRODUÇÃO

O ensino público em nosso país, há anos, passa por inúmeras dificuldades: faltam recursos financeiros, humanos, físicos e estruturais. Podemos aqui citar como exemplo o ensino de Física, cujos laboratórios experimentais e de informática são, em sua maioria, precários. Além disso, o professor, na maioria das vezes, não encontra na biblioteca da escola bons livros didáticos e revistas para assim preparar seus planos de aula. O mais agravante para a Física, em particular, é a falta de professores com a habilitação adequada na área, levando licenciados em áreas afins a lecionarem a disciplina, em geral, sem o devido preparo e/ou a devida motivação.

Temos também a questão de faculdades e universidades que adotam no seu currículo em uma mesma graduação, a habilitação para duas ou mais disciplinas, ou seja, Matemática e Física; Química e Matemática; Química e Física. A questão é a qualidade deste ensino. São abordados, com seriedade, todos os conteúdos necessários dessas disciplinas para formar um bom professor ou esta é uma estratégia para suprir a falta de professores nestas áreas?

Estes episódios, muitas vezes, prejudicam o professor, pois deixam grandes lacunas em sua formação. Por exemplo, conteúdos que fazem parte da Física Moderna e Contemporânea (FMC), quando apresentados, na grande maioria nesse tipo de formação, são apenas comentados superficialmente. Conseqüentemente, esses futuros professores não se sentem preparados para trabalhar tais assuntos com seus alunos. Fato que leva muitos professores a enfatizar somente conteúdos como cinemática, dinâmica, termodinâmica, termometria e eletrodinâmica.

Poucos livros didáticos, como por exemplo, dos autores Beatriz Alvarenga e Antônio Máximo (1997); do autor Alberto Gaspar (2001); do autor Paul Hewitt (2002) e do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física – GREF (2005); do autor Djalma Nunes da Silva (2003); Wilson Carron e Osvaldo Guimarães (2003); possuem capítulos ou textos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) que abordam assuntos como: o nascimento da física quântica, a

teoria da relatividade, o modelo atual do átomo à física de partículas, fontes de energia, a dualidade onda-partícula, pois visam a necessidade de levar o assunto para o nível médio e de maneira que o professor trabalhe sua parte histórica e teórica, sem aprofundamentos matemáticos. Com isso, os alunos adquirem uma visão do que está sendo estudado e pesquisado nos dias de hoje, das evoluções tecnológicas que se dão através destes estudos.

Na dissertação de Rogério Ávila Chiarelli (2007), ele descreve em sua conclusão que é sim possível abordar conceitos de física quântica no Ensino Médio e traz em sua revisão da literatura uma análise dos quatro primeiros autores de livros didáticos: Beatriz Alvarenga e Antônio Máximo (1997); Alberto Gaspar (2000); Paul Hewitt (2002) e do Grupo de Reelaboração do Ensino de Física – GREF (1993), que possuem vários tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC). Mas é importante ressaltar, que a maioria dos professores ao prepararem suas aulas, consultam em livros cedidos pelas editoras, que em sua grande maioria são volumes únicos, ou seja, os conteúdos dos três anos estão compactados em um único livro, diminuindo assim os tópicos, principalmente aos que se referem a Física Moderna e Contemporânea. Por exemplo, os livros de Carron e Guimarães (2003); e Djalma Nunes da Silva (2003) abordam esses assuntos muito superficialmente e o do Bonjorno (2001) que é utilizado pelos professores de nossa região, não abordam assuntos da FMC.

Em geral, vale a afirmação de que numa típica cidade de interior, em uma escola pública tradicional, o professor de Física que pode ser formado em Matemática, Biologia ou Química, por exemplo, tem e adota livros que são doados por alguma editora. Esses livros que são utilizados para elaboração de seus planos de aula, nem são os mais caros e dificilmente seriam os melhores. Levando-se em conta, ainda, o contexto social e econômico dos professores da escola pública, este livro acaba sendo sua única referência. Esse fato vinculado à grande falta de professores de Física, no país, descortina um panorama nada propício às metas de desenvolvimento de um país que visa, num futuro próximo, competência tecnológica.

Por outro lado, temos o avanço da tecnologia que coloca, a cada dia, novos desafios para a educação em todos os níveis e nas mais diversas áreas. Do ponto de vista das ciências

humanas, as questões da ética se deparam com temas das células tronco, da clonagem, dos transgênicos e outros problemas correlacionados. Do ponto de vista das ciências exatas, deparamo-nos com a questão da energia e o uso da energia nuclear, com a questão da nanotecnologia e suas conseqüências. Opinar ou mesmo tomar decisões sobre assuntos polêmicos como esses, que afetam o desenvolvimento do país, será dever de todo o cidadão em uma sociedade que se torna cada vez mais democrática. Por isso, a preocupação constante dos últimos governos em relação à democratização da informação e à popularização da ciência².

Levando em conta a realidade sócio-cultural da nossa região e as diretrizes governamentais, propomos um projeto de qualificação do professor que leciona Física. Embora essa iniciativa seja relativamente pequena frente às necessidades do nosso estado, ela não é isolada e satisfaz, também, outro ponto crucial da política governamental que é a formação de multiplicadores.

Com o objetivo de suplementar a realidade sócio-econômica, pois muitos professores de escolas públicas não têm o seu próprio computador, uma minoria da população brasileira tem acesso regular à *internet* e uma pequena parcela de professores da rede pública tem acesso a bons cursos de formação universitária, preparamos materiais que permitam ao professor o uso de *internet* (quando viável) e também o uso de recursos que não dependam do computador. É importante ressaltar aqui, que mesmo que as escolas públicas de Ensino Médio tendo seu laboratório de informática, os números de computadores muitas vezes não são suficientes para atender uma demanda de 30 alunos que trabalhem de modo satisfatório, além do fato de que o número de horas, no laboratório, para cada disciplina acaba sendo restrito. Visar uma aprendizagem significativa, em meios que não são os ideais, foi o nosso principal objetivo. Nossa proposta foi a elaboração de materiais para o professor de Física, que sejam de fácil compreensão e potencial teórico significativo e que possam proporcionar multiplicidade de idéias para se trabalhar determinados fenômenos físicos, mais especificamente, os fenômenos ondulatórios clássicos de interferência, difração e polarização da luz, salientando sua importância como “ponte” para o aprendizado de Física Moderna e Contemporânea.

² (<http://www.comciencia.br/reportagens/2005/12/14.shtml>, acesso em jan. 2006).

Os fenômenos ondulatórios da luz formam parte do conteúdo previsto no terceiro ano do Ensino Médio e, quando abordado em sala de aula, acaba sendo feito de modo bastante simplista e pouco interessante. Os livros didáticos não exploram a potencialidade do caráter ondulatório da luz como “ponte”, “porta de entrada” ou conhecimento prévio para a introdução da Física Moderna no Ensino Médio (Bonjorno 2001, Carron 2003, Silva 2003). A idéia de usarmos a fenomenologia da luz como base para discussões introdutórias da Física Moderna e Contemporânea é também defendida por outros autores (Pessoa 2003, Ostermann, Prado e Ricci 2006).

Os textos sobre fenômenos ondulatórios clássicos (Apêndice A) e Física Moderna e Contemporânea (Apêndice C) e os guias experimentais para o *software* educacional Interferômetro Mach-Zehnder³ (Apêndice B), readaptados neste trabalho, e que foi apresentado a um grupo de seis professores da rede pública estadual que trabalham nas cidades de Santa Cruz do Sul, Vera Cruz, Venâncio Aires, Passo do Sobrado e Vale do Sol (RS), tinham a proposta de instigar o professor através dos tópicos de fenômenos ondulatórios clássicos aos tópicos correlacionados à Física Moderna e Contemporânea, ou seja, a Física Clássica (FC) serviria como conhecimento prévio para a introdução da Física Moderna e Contemporânea (FMC). Alguns desses professores, além de trabalharem em escolas públicas estaduais, trabalham também em escolas particulares e fizeram questão de divulgar os materiais apresentados nestes encontros para seus colegas, que por um motivo ou outro não puderam se inscrever no curso.

Com o objetivo de atrair uma quantidade de professores de diferentes cidades, os participantes receberam um certificado de Curso de Extensão pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O certificado poderá ser usado para pontuação em futuros concursos públicos ou mudanças de classe para os já concursados.

Na seqüência, apresentamos a estrutura da dissertação. No capítulo 2, descrevemos a importância do uso do computador através de um *software* educacional (IMZ) como instrumento facilitador para uma boa aprendizagem e também textos e órgãos que

³ O *software* do Interferômetro de Mach-Zehnder, disponível na *internet*, o endereço está nas notas bibliográficas.

argumentam e justificam a necessidade da inclusão da Física Moderna e Contemporânea em nossos currículos escolares.

Nossa proposta está fundamentada na filosofia do construtivismo, apoiada nas idéias de Ausubel, o qual retrata que um dos fatores para haver aprendizagem é a ocorrência da interação da nova informação com o conhecimento já existente. O capítulo 3 descreve nosso referencial teórico.

As atividades e textos foram aplicados em curso no laboratório de informática da Escola Estadual de Ensino Médio “Ernesto Alves de Oliveira”, em Santa Cruz do Sul, RS, com aulas ministradas para professores que lecionam Física em rede pública. O relato desta experiência didática é apresentado nos capítulos 4 e 5. Comentários finais fazem parte do capítulo 6.

O material que foi utilizado nos encontros com os professores, como textos, guias experimentais e questões são encontrados nos apêndices.

2 ESTUDOS RELACIONADOS

No acompanhamento literário, encontramos alguns artigos referentes à utilização de *software* educacional em sala de aula e vários artigos que abordam a necessidade da inserção da Física Moderna e Contemporânea nos currículos do Ensino Médio.

Os estudos relacionados foram realizados principalmente em revistas da área de ensino de Física: Revista Brasileira de Ensino de Física, Caderno Catarinense de Ensino de Física, em dissertações de Mestrado em Ensino de Física da UFRGS e no PCN + Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNEM).

2.1 O uso de *software* educacional como ferramenta para uma aprendizagem significativa

Uma ferramenta que cada vez mais se apresenta como aliada do processo de ensino-aprendizagem é o computador, pois o uso dessa tecnologia nos possibilita levar ao conhecimento dos nossos alunos programas, experimentos virtuais e revistas que nossas escolas não teriam acesso por falta de recursos financeiros.

Os autores Dias, Pinheiro e Barroso (2002), do texto Laboratório Virtual de Física Nuclear, colocam a necessidade de usar os laboratórios de informática, mesmo que não tenham um computador para cada aluno, pois a maioria dos laboratórios de ensino não são equipados com aparelhos modernos e com os devidos materiais experimentais. Por isso, os programas educacionais ocupam papel importante na aprendizagem, dando acesso a vários experimentos que jamais poderiam ser visualizados pelos alunos de Ensino Médio e até mesmo de graduação.

O computador está presente no cotidiano de muitos de nosso alunos do Ensino Médio, seja por acesso na escola, em *lan house*, ou até de uso domiciliar. Devemos utilizá-lo como

ferramenta de pesquisas e estudos, porém nós, professores, temos a tarefa de planejar o método, a proposta a ser aplicada em nossas aulas virtuais, pois temos o dever de propor um trabalho onde os alunos devam interagir, questionar, ser participantes na construção dos experimentos ou até mesmo dos guias experimentais. Essencialmente, o *software* deve possibilitar integração para que haja aprendizagem significativa. Um *software* ou um sítio que apresente somente perguntas cujas possibilidades de respostas sejam sim ou não, dificilmente levará à construção de uma aprendizagem significativa.

Segundo Rezende (2000), o uso de *software* educacional é necessário, mas os mesmos devem possibilitar a interatividade e simular aspectos da realidade. O uso de *software* pode também auxiliar na questão do tempo previsto para o conteúdo, uma vez que possibilita a interação à distância e o acesso a informações tais como: textos, animações e vídeos.

No Programa do Mestrado Profissional em Ensino de Física (UFRGS) enfatiza-se o uso das novas tecnologias e a importância da participação dos alunos na construção do conhecimento. O aluno deve interagir com o programa, ou seja, o programa deve possibilitar trocas de instrumentos, de objetos. Sendo assim, o aluno pode desenvolver seu guia experimental e fazer seus questionamentos com mais convicção.

Lembramos que os programas educacionais devem ser uma estratégia adotada no ensino, e não a única. Devemos, quando possível, diversificar nossas aulas, ou seja, no laboratório de ciência ou de informática realizando experimentos, construindo com os alunos mapas conceituais, para que haja aprendizagem e que aos poucos nossas metodologias não sejam ditas pelos alunos como desmotivantes.

2.1.1 Utilização do *software* educacional IMZ como meio facilitador no ensino de fenômenos ondulatórios e como meio de inserção da FMC no Ensino Médio

Como retratado anteriormente, os livros didáticos mais populares entre os professores da rede pública não dão a ênfase necessária aos fenômenos ondulatórios clássicos, que são de grande relevância para o entendimento de assuntos voltados à FMC.

Os livros didáticos, em sua maioria, trazem poucos parágrafos sobre difração, interferência e polarização da luz, com ilustrações que não mexem com a imaginação dos alunos. Assim, após uma abordagem sobre estes assuntos, sugerimos aos professores que trabalhem com o *software* educacional IMZ, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda>, pois este possibilita a interação do aluno com o interferômetro, fazendo com que o mesmo visualize e observe tirando suas próprias conclusões sobre tais fenômenos ondulatórios.

Ressalta-se que o interferômetro virtual de Mach-Zehnder é um arranjo experimental o qual permite observar interferência entre ondas, e que segundo Ostermann e Prado (2005), são freqüentes os artigos que o relacionam ao ensino de Física.

Salientamos que o programa traz duas fontes de luz coerentes, possibilitando assim o fenômeno de interferência da luz: uma delas é o *laser* e a outra são fótons únicos. Inicialmente trabalhamos com a fonte *laser*, pois assim tratamos de experimento da Física Clássica ou dita Newtoniana, mostrando os fenômenos de interferência e polarização e posteriormente, usamos a opção fótons únicos com o qual é possível observar fenômenos da Física Moderna.

No regime clássico, o *software* possibilita a visualização do fenômeno de interferência de luz, mostrando a trajetória da luz, seu comportamento ondulatório, e a superposição das ondas refletidas pelos espelhos semi-refletores vistas nos anteparos.

Já tendo o programa instalado, na faixa cinza abaixo do interferômetro virtual, pode-se optar por um dos três idiomas que o *software* oferece, a fonte, visualização da trajetória dos feixes (ondas) e mudar o ponto de vista do IMZ. Podemos dizer que esta faixa cinza é o “painel de controle” do *software*. Nas figuras 1 e 2, visualizaremos os objetos que compõem o interferômetro, explicações sobre sua estrutura são encontradas no apêndice B ou A.

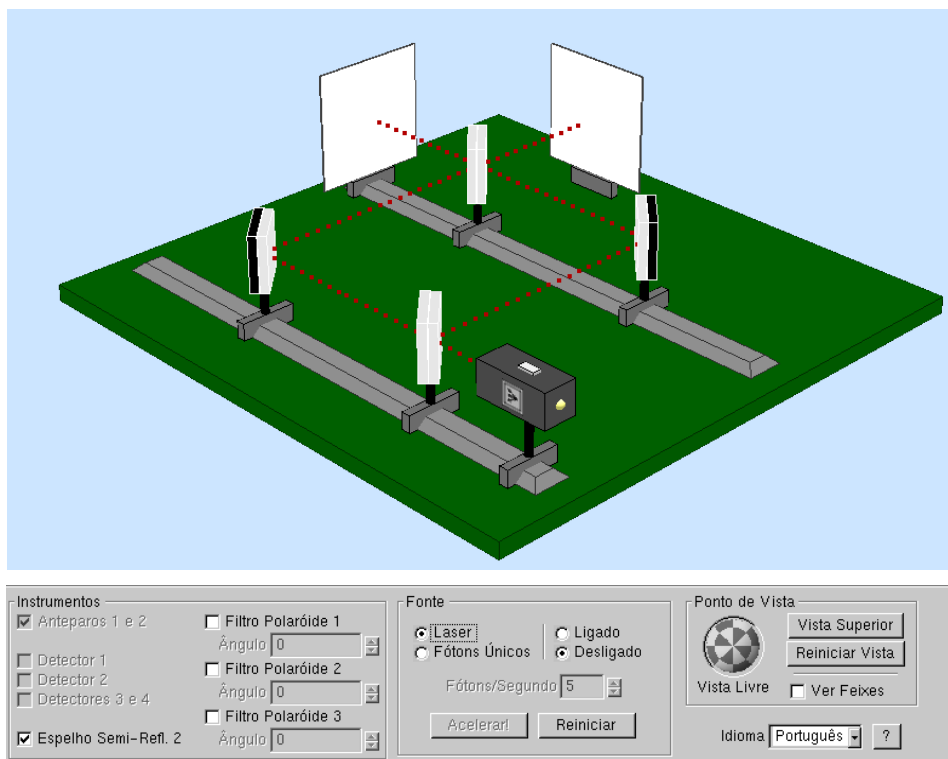


Figura 1- IMZ com a trajetória da onda

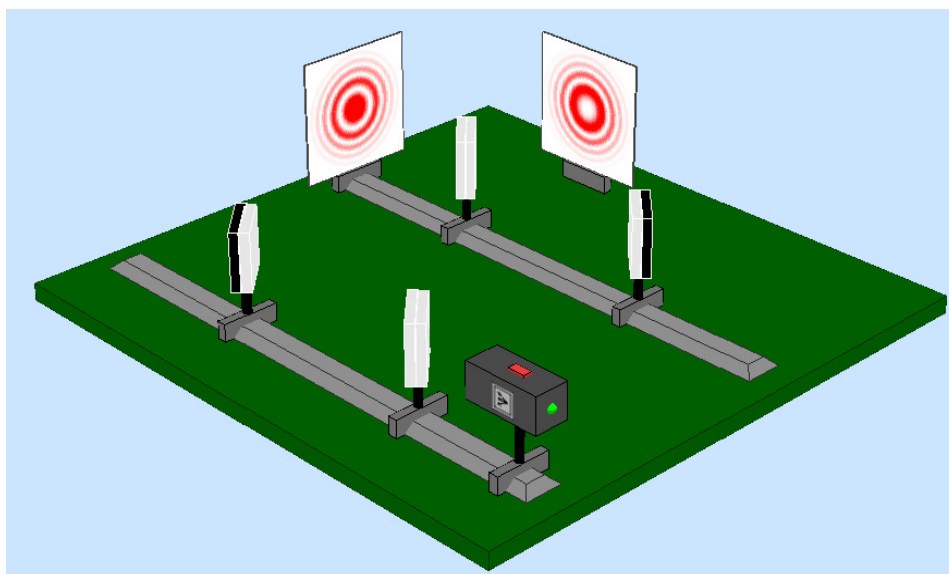


Figura 2- Fenômeno de interferência construtiva e destrutiva, com fonte laser

Após analisarmos experimentos com a fonte de luz *laser*, com e sem o segundo espelho semi-refletor, podemos mostrar para os alunos a possibilidade de colocarmos no experimento os polarizadores (figuras 3 e 4), caso eles já não tenham feito esta observação. Pedimos que os mesmos analisem o efeito que o polarizador ou os polarizadores causam na

experiência e o que acontece se mudarmos os graus dos polarizadores, o que verificamos nos anteparos. Usando esta metodologia de trabalho, fazemos com que os alunos possam ancorar os novos conhecimentos, as novas idéias retratadas anteriormente, através da leitura e explicação feita pelo professor, proporcionando assim, uma aprendizagem significativa.

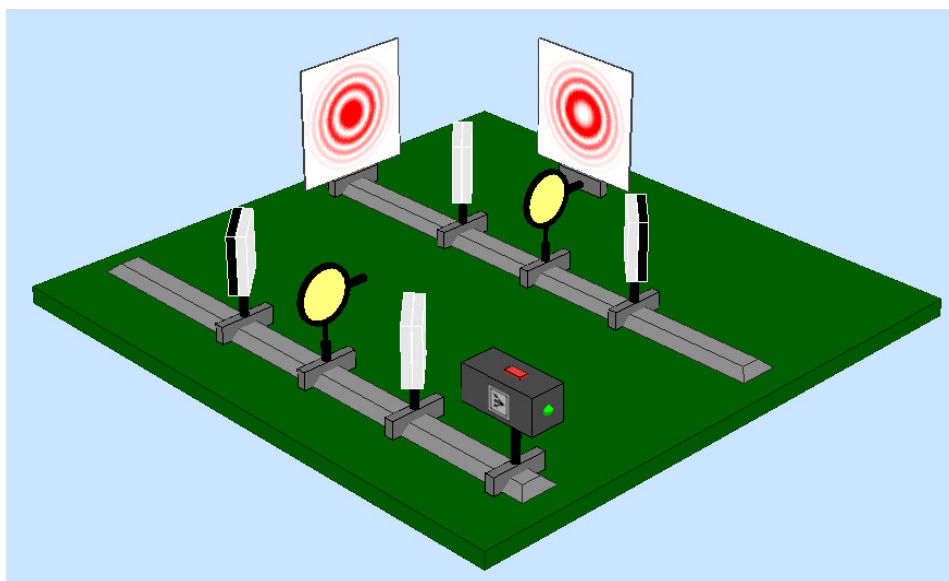


Figura 3 – Interferência de luz com fonte laser e dois polaróides em 0 grau

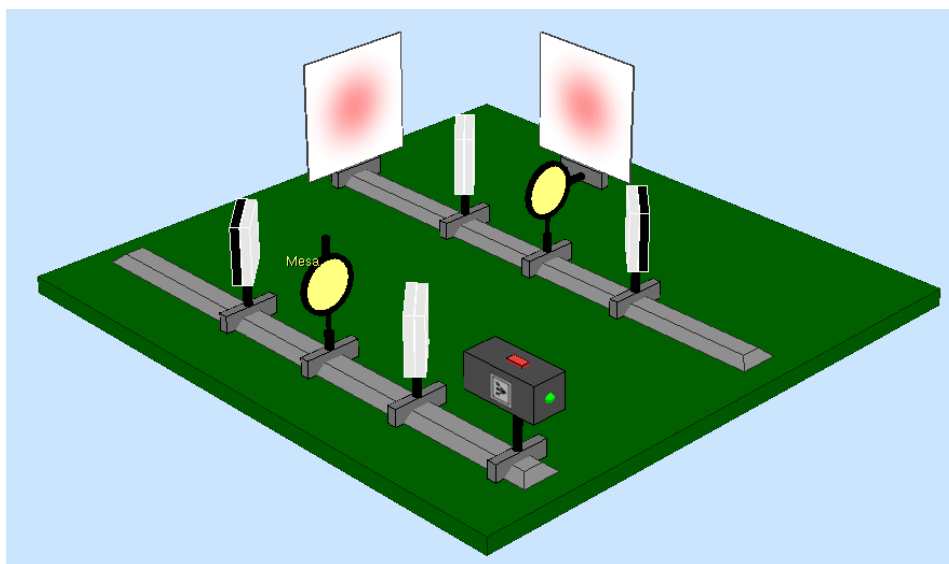


Figura 4 – Interferência de luz com fonte laser e dois polaróides em 90 graus e 0 grau

Já com a fonte em fótons únicos, podemos explicar superficialmente para os alunos, o fato de que a luz ora pode ser tratada como onda, ora como partícula (figuras 5 e 6). Ou seja, para alguns experimentos macroscópicos a luz se comporta como onda, em outros,

microscópicos, se comporta como partícula levando físicos e pesquisadores a adotarem uma epistemologia (Ostermann e Prado, 2005), que almeja interpretar os possíveis comportamentos da luz.

Entretanto, o professor que trabalhar com os alunos esses assuntos deve, pelo menos, comentar a existência de tais interpretações epistemológicas e, se possível, ancorar-se em uma e mostrar, através do *software* educacional IMZ, a possibilidade de fazer experimentos com *laser* e com a fonte monofotônica, com e sem os detectores⁴ e polaróides. Os alunos devem fazer observações comparando o que o anteparo registra nas diversas situações. Assim, podemos introduzir mais especificamente, tópicos da FMC, como o princípio da incerteza e o problema da medida.

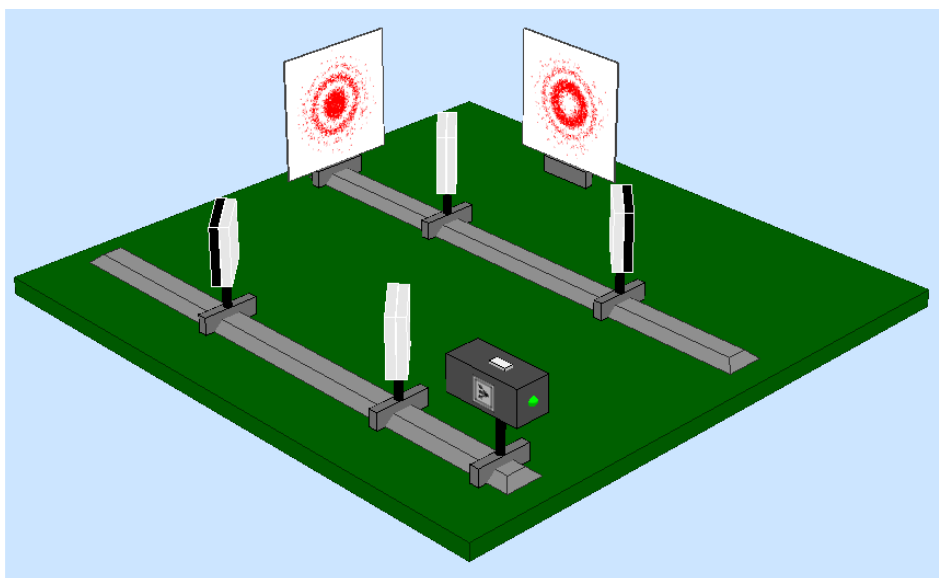


Figura 5 –Interferência de luz com fonte de fótons únicos

⁴ Podemos citar um filme fotográfico como um exemplo de detector.

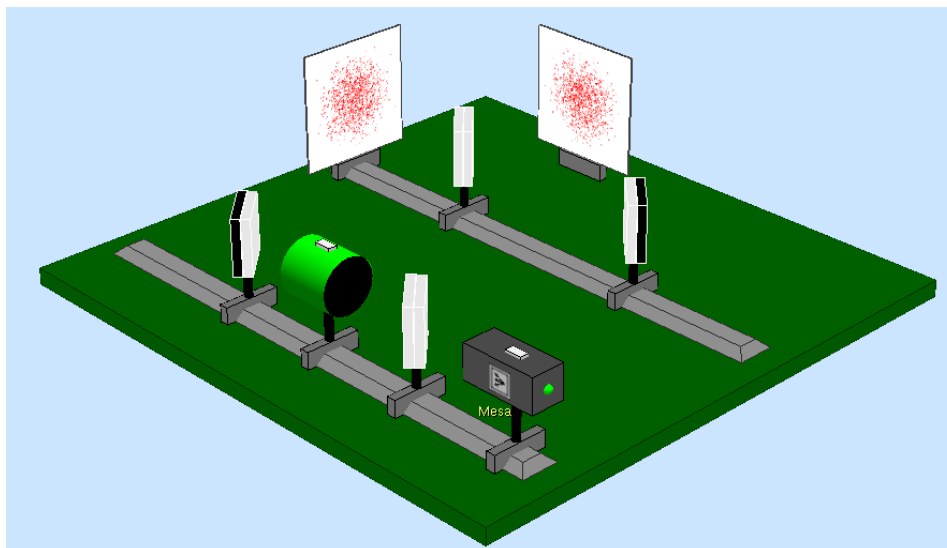


Figura 6 – No aparato não há interferência quando colocado um detector, cuja fonte é de fótons únicos

2.2 A inserção da Física Moderna e Contemporânea (FMC) nos currículos do Ensino Médio

Existem muitos relatos em publicações feitas em revistas, como a Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF) e o Caderno Brasileiro de Ensino de Física, sobre a necessidade da inclusão de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea nos nossos currículos, não só porque em países como a Espanha, Argentina, Estados Unidos, entre outros já têm em seus currículos tópicos da Física Moderna e Contemporânea, mas porque cada indivíduo tem o direito de compreender os fenômenos ligados ao seu cotidiano, sejam eles de origem natural ou tecnológica. Em tais países, busca-se a melhor metodologia a ser aplicada na preparação de bons materiais didáticos, de modo a facilitar a aprendizagem de um assunto tão abstrato, porém necessário para que possamos agir como cidadãos que conhecem o mundo a sua volta. Esses artigos ainda observam as inúmeras possibilidades de haver aprendizagem por parte dos alunos de Ensino Médio de FMC, mesmo que com poucas exigências de cálculos matemáticos (Chiarelli, 2007).

O PCNEM (2004) aborda a necessidade de trabalharmos os conteúdos de Física Moderna, mas dá ao professor autonomia para escolher quais conteúdos a serem trabalhados durante o ano letivo. A razão para essa liberdade é devida, principalmente, às condições

sociais e econômicas que cada escola oferece. Outras justificativas para a abordagem da Física Moderna nas escolas são alguns programas como: Programa de Ingresso ao Ensino Superior (PEIES), Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM) e os próprios vestibulares cobram em seus cronogramas, cada vez mais, parte desses conteúdos. Para cumprir essa tarefa, os professores do Ensino Médio deverão ser cada vez mais capacitados e qualificados e as bibliotecas das escolas públicas precisarão de um bom acervo para pesquisas e consultas.

Um país que não se preocupa em atualizar a educação de seu povo, que fecha os olhos para questões como a de currículos escolares desatualizados, com certeza não conseguirá se desenvolver tecnologicamente. Nosso país quer estar incluso nessa lista de países desenvolvidos, e aos poucos vem buscando por meio, principalmente das universidades, propor cursos, palestras, materiais didáticos de livre acesso para que, tanto os professores recém-formados possam sair plenamente habilitados, quanto os professores que há anos estão formados e continuam buscando atualizações. Porém, para que possamos incluir tais assuntos nos currículos devemos preparar os professores através de cursos e materiais didáticos como: textos de apoio, programas educacionais, livros de qualidade, pois aos poucos já encontramos questões que envolva assuntos da Física Moderna e Contemporânea em vestibulares, principalmente de universidades públicas, ENEM e PEIES. Sem pensar que não podemos nos enganar, e muito menos enganar os alunos dizendo que as pesquisas e descobertas estacionaram no século XIX, e que nada além do eletromagnetismo existe ou, mais cruel ainda, dizer que não necessitam aprender assuntos tão complexos, assim ignorando ou julgando sua capacidade de aprendizado.

Como saberemos se os alunos são capazes de aprender por exemplo Física quântica, um dos tópicos da FMC? Muitos estudos foram realizados e ainda estão sendo realizados neste sentido e a maioria apresentaram aspectos positivos. Como retrata Cavalcante, Jardim e Barros (1999): *“É necessária a inserção de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, mesmo diante da fragilidade dos conhecimentos de Física Clássica pelos alunos: não devemos aceitar a idéia restritiva de pré-requisitos, que tende a julgar jovens adolescentes, incapazes de perceber a complicada lógica quântica, antes de dominarem todo o instrumental clássico.”* (p.154).

Outro importante órgão que vem contribuindo muito para inserir FMC no nosso currículo é a Sociedade Brasileira de Física (SBF), através de publicações de artigos direcionados à área, de uma série de livros dirigidos a professores do Ensino Médio, entre outros trabalhos (Sales, 2008).

Entretanto, a maioria dos autores aborda a importância de um bom material de apoio e ressaltam que as metodologias, abordagens de idéias e conceitos básicos da FMC devem ser claras perante o professor, ou seja, pode-se adotar o método de explicar FMC comparando com a Física Clássica ou pelo método de abordá-la sem usar a comparação, usando apenas os fatos que levaram à necessidade de uma nova Física.

O importante, é que aos poucos tais assuntos estejam na “boca e na mente” de nossos alunos, como diz Terrazzan (1992): *“O que não podemos é esperar a entrada do século XXI para iniciarmos a discussão nas escolas da Física do Século XX. Utilizando uma frase de um colega pesquisador em ensino de física, Prof. João Zanetic da USP, é fundamental que ‘ensinamos a física do século XX antes que ele acabe’.”* (p.211).

É verdade que estamos um pouco atrasados, entretanto muitos esforços estão sendo feitos. Nossa universidade, por exemplo, vem apresentando bons trabalhos na área de FMC, nos seus mestrados, em particular no mestrado profissional que visa, no final do curso, gerar “produtos”, ou seja, materiais de apoio aos professores como textos, programas educacionais, e sítios de livre acesso.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Construtivismo

O homem, há séculos, sentiu a necessidade de conhecer melhor o meio em que vive e, com isso, contribuiu muito para, pouco a pouco, termos mais conforto, segurança e praticidade, principalmente, na área tecnológica. Porém, sentiu necessidade de investigar o comportamento humano, quem somos, de onde viemos e como aprendemos, por exemplo. Assim surgiram vários ramos de pesquisas, sendo um deles o que pesquisa sobre o ensino e a aprendizagem, no qual buscam-se respostas para o que é aprendizagem, porque funciona, como funciona, como obtemos conhecimento, como lidamos com novas informações.

Dessas pesquisas surgiram pontos de vista diferentes. Podemos dizer que surgiram, então, grupos que defendiam suas convicções, surgindo filosofias a respeito do ensino e da aprendizagem. Segundo Moreira (1999), existem três filosofias subjacentes para as teorias de aprendizagem – a comportamentalista (behaviorismo), a humanista e a cognitivista (construtivismo), sendo que algumas teorias apresentam aspectos referentes a mais de uma filosofia.

Como o presente trabalho resulta em um material didático com enfoque na aprendizagem significativa de Ausubel, que é ligado a corrente da filosofia do construtivismo, comentaremos brevemente aspectos da filosofia construtivista e da teoria da aprendizagem significativa.

Sabe-se que o cognitivismo (construtivismo) surgiu na mesma época que o behaviorismo em sua contradição, pois para os behavioristas o centro de suas pesquisas era o “*como fazem*” e os cognitivistas tinham suas pesquisas voltadas para os “*processos mentais*”, e seu referencial era marcado pela idéia de que o homem constrói o seu conhecimento.

Atualmente, o construtivismo é o principal marco teórico para o ensino e a aprendizagem. São construtivistas por compartilharem da idéia de que a cognição se dá por construção. Segundo Moreira e Ostermann, 1999: “*O construtivismo é uma posição filosófica cognitivista interpretacionista. Cognitivista porque se ocupa da cognição, de como o indivíduo conhece, de como ele constrói sua estrutura cognitiva. Interpretacionista porque supõem que os eventos e objetivos do universo são interpretados pelo sujeito cognoscente.*” (p.7).

Ao pesquisarmos sobre referencial teórico construtivista, encontramos alguns autores como Piaget, Vigotsky, Ausubel, Kelly, Novak (Moreira,1999) que trabalham com essa linha de pensamento, porém cada um apresenta com enfoque diferente. Um enfatiza a aprendizagem através da teoria do desenvolvimento cognitivo (Piaget), outro da teoria da mediação (Vigotsky), ou pela teoria da aprendizagem significativa (Ausubel e adotada por Novak), ou pela teoria dos construtos pessoais (Kelly). Com isso, temos várias teorias representando a filosofia construtivista.

3.2 Teoria da aprendizagem significativa de Ausubel

A teoria de aprendizagem que mais se identifica com este trabalho é a teoria da aprendizagem significativa do psicólogo educacional David Ausubel, pois tem como instrumentos para a aprendizagem os organizadores prévios e os subsunçores⁵.

Para Ausubel, (Moreira,1999) buscar uma aprendizagem realmente significativa está relacionada a certas etapas ou processos. Primeiramente, procuramos averiguar quais os conhecimentos que o aprendiz já possui sobre o assunto, isto é, o tema a ser abordado. Conseguimos tais resultados de diversas maneiras: pedindo para que o aprendiz escreva o que ele sabe sobre o tema; pode-se preparar um questionário bem elaborado, que não venha a induzir o aprendiz; podemos gerar uma discussão em grande grupo onde todos tenham a

⁵ A palavra subsunçor não é uma palavra existente na Língua Portuguesa. Foi aportuguesada sendo equivalente a inseridor, facilitador ou subordinador.

chance de expor suas idéias ou, ainda, através de um mapa conceitual (no anexo A há um texto explicando mapas conceituais). Com base nestes resultados, pode-se desenvolver um material didático que seja potencialmente significativo, ao qual seja relacionável à estrutura cognitiva de seus aprendizes.

O conhecimento já existente em cada indivíduo é o que Ausubel chama de subsunçor. Esses subsunçores podem ser fortes, claros, abrangentes, intermediários, relevantes, fracos. Podendo ser remodelados, reestruturados à medida que ancoramos a eles novas informações e os fazemos interagir. Essa interação entre a nova informação e o que o aprendiz já sabia (subsunçores) é muito importante, pois estamos ligando fatos, conceitos, imagens, proposições e, ao conseguirmos relacionar o novo com o velho, aumentamos ou até modificamos nosso subsunçor, nossa idéia inicial.

A teoria da aprendizagem significativa de Ausubel atribui ao subsunçor um importante papel. Podemos dizer que a palavra-chave desta teoria é o subsunçor. É através das interações entre as novas e antigas informações que vamos deixando nossos subsunçores mais capazes, fortes e enriquecidos, servindo como uma boa base para outras novas informações subjacentes a assuntos relacionados ao tema abordado.

Segundo Moreira (1999), Ausubel explica o armazenamento de informações na mente humana sendo muito organizado, uma espécie de hierarquia do conhecimento, onde conceitos mais específicos estão ligados ou relacionados aos conceitos mais gerais. Mas uma pergunta vem à nossa mente: qual a origem dos primeiros subsunçores e como novas informações são relacionadas a algo já estruturado? Uma das respostas possíveis e plausíveis é que quando o indivíduo não tem nenhum conhecimento em determinado assunto, ele obtém a informação inicial através da aprendizagem mecânica, que ocorre até que alguns elementos de conhecimento existam nessa área e que possam servir de subsunçores. Outra possível resposta é que em crianças pequenas, os conceitos são adquiridos por um processo chamado de formação de conceitos. Segundo Moreira e Ostermann (1999), na formação de conceitos, a criança adquire o conceito de “cachorro” por encontros sucessivos com cachorros até que possa generalizar os seus atributos.

E quando não existem subsunçores referentes a um tema específico, o que fazer? Ausubel em sua teoria sugere a criação de subsunçores através de organizadores prévios, que nada mais são do que materiais didáticos elaborados de acordo com os resultados obtidos em sua pesquisa, referentes à estrutura cognitiva dos aprendizes, podendo ser textos, artigos, e pesquisas feitas pelos aprendizes em bibliografias indicadas pelo professor. Entretanto, essas leituras e pesquisas devem ocorrer antes do tema ser abordado em aula, para que se consiga o objetivo de manipular a estrutura cognitiva, ou ainda, fortalecer aquela já existente, porém não muito estabelecida.

Para haver condições de ocorrer uma aprendizagem significativa, segundo Ausubel, dois aspectos são fundamentais. O primeiro, já citado anteriormente, é que o material a ser aprendido seja relacionável à estrutura cognitiva do aprendiz, de maneira não-arbitrária e não literal. O segundo, é a necessidade do aprendiz manifestar uma disposição para relacionar de maneira substantiva e não-arbitrária esse novo material.

Segundo Ausubel, uma maneira de averiguar se o material utilizado para abordar um certo conteúdo de aula, por exemplo, foi realmente significativo, podendo ser dito potencialmente significativo, deve-se como método de avaliação, utilizar recursos que não sejam próximos desses aprendizes, ou seja, não sejam familiares aos mesmos. Ele propõe então, que sejam elaboradas questões/problemas que requeiram uma transformação no conhecimento do indivíduo.

Outra maneira de avaliar, segundo a teoria da aprendizagem significativa, é a proposta por Novak e seus colaboradores, que utilizam como técnica a construção de mapas conceituais. O uso dessa técnica não abrange apenas um meio de avaliação, mas também é proposta como instrumento didático e de análise de currículo ou um modo de averiguar o conhecimento prévio de uma pessoa ou de uma turma.

Porém, ressaltamos que para se utilizar esta técnica, é importante que a pessoa que a utilize como forma de avaliação, por exemplo, tenham um grau de conhecimento acerca do assunto a ser discutido.

No anexo A é possível encontrar informações mais específicas sobre esta técnica proposta por Novak. Nele encontra-se um artigo que explica brevemente o que é, para que serve e como construir um mapa conceitual. Há, também, mais informações nos livros que estão citados nas Referências deste artigo.

4 PROPOSTA E METODOLOGIA

4.1 A Proposta

Vários órgãos competentes ligados ou não à educação visualizam a necessidade de melhorias no ensino de nosso país, porém essa melhoria não ocorrerá de uma hora para outra. Sabemos disso, pois ouvimos discursos há vários anos de que a educação só será de qualidade no momento que investirmos no professor. E, não apenas com bons salários, mas principalmente com bons cursos de qualificação, deixando o professor atualizado e preparado para executar sua função.

O nosso Mestrado Profissional no Ensino de Física está voltado para questões relacionadas com a melhoria do ensino, em especial ao de Física. Estamos prosperando com bons trabalhos, e todos eles resultam em um material didático de livre acesso que podem ser encontrados no sítio do Instituto de Física desta universidade.

A proposta de nosso trabalho foi abordar na forma de curso para professores, o assunto interferência através do *software* educacional livre do interferômetro de Mach-Zehnder, com uma versão mais recente do *software* IMZ, disponível em <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda>, que possui tradução para três línguas (sendo o português uma delas) podendo ser utilizado, além dos detectores, os polaróides. Este *software* é do “tipo” bancada virtual e já vem sendo utilizado em aulas no mestrado profissional, no Instituto de Física da UFRGS. Para trabalharmos com IMZ, foram utilizados guias experimentais que serviram de base para os estudos realizados. Esses guias foram readaptados a partir do guia experimental confeccionado pelos Professores Trieste Ricci e Fernanda Ostermann para aulas de introdução à Física quântica. Estes guias (Apêndice B) podem ser readaptados ou modificados por quem os utilizar.

Para que o nosso material apresentasse uma estrutura potencialmente significativa, àqueles que não tinham claramente uma estrutura cognitiva nessa área do conhecimento,

elaboramos um texto (Apêndice A) que relata brevemente os fenômenos ondulatórios dando ênfase a interferência da luz, que serviu como organizador prévio.

Além de textos, foram elaborados questionários que visam conhecer as realidades vivenciadas pelos professores no âmbito escolar e quais os conhecimentos prévios sobre assuntos ligados aos fenômenos ondulatórios da luz em regime clássico e quântico (Anexo B). Foi elaborada uma apresentação, utilizando o *software Power Point*, sobre Mapas Conceituais, uma breve explicação, pois ao efetuarem as inscrições cada um recebeu um texto sobre Mapas Conceituais e Aprendizagem Significativa (Anexo A), elaborado pelo Professor Dr. Marco A. Moreira que autorizou o uso do mesmo, neste curso. Esta apresentação foi elaborada com base neste artigo, sendo assim não houve necessidade de disponibilizá-la. Sendo assim, cada pessoa ou dupla que participou do curso, construiu um Mapa Conceitual com o tema fenômenos ondulatórios (ondas).

Como já foi dito, foram elaborados guias experimentais para a utilização do *software* do IMZ, com base no guia experimental usado por alguns professores do Instituto de Física da UFRGS. O guia apresentava fenômenos da Física Clássica e Quântica, sugerindo questões trabalhadas na Física quântica.

Devido a esse fato, elaboramos outro texto de apoio com noções básicas de fenômenos quânticos (Apêndice C) que podem ser trabalhados a partir de estudos realizados através do *software* IMZ. Este texto servirá para instigar o professor a fazer mais leituras e cursos sobre o assunto. Pensamos que o texto servirá como organizador prévio para novas informações que os mesmos buscarão.

Como é de argumento do nosso referencial teórico, sendo o material didático de potencial significativo, o aprendiz terá ancorado às novas informações, conceitos no seu antigo subsunçor, deixando-o mais abrangente. Ele relaciona os conceitos e modifica seu subsunçor, sendo que está apto para armazenar outras novas informações que venham a corroborar com mais saberes.

Para averiguar se houve uma aprendizagem significativa dos professores que tiveram acesso ao nosso material, foram propostos dois métodos de avaliação que foram aplicados antes e após o uso do material confeccionado para fins do ensino e aprendizagem. Um destes métodos foi um questionário, que tinha por objetivo conhecer o meio e as condições de trabalho dos participantes e seu conhecimento quanto aos fenômenos ondulatórios da luz e conceitos básicos que tais fenômenos possam interagir na FMC. Outro método de avaliação proposta, foi a elaboração de mapas conceituais sobre os fenômenos ondulatórios, pois segundo nosso referencial teórico, temos que optar por uma avaliação não familiar, diferente das que os aprendizes estão acostumados para obtermos melhores resultados.

Com base nas interpretações obtidas nos questionários e mapas conceituais pudemos avaliar nosso material de ensino, que foi apresentado na forma de um curso para um grupo de seis (6) professores da rede estadual, que lecionam Física nas escolas que representam a 6ª Coordenadoria Regional de Educação, dando o apoio necessário no que diz respeito ao espaço físico (escola em que ocorreu o curso) e liberação dos professores, caso esses estivessem em horário de serviço em algum dos turnos em que procedeu o curso. Essa análise do material foi feita através dos resultados obtidos por cada participante do curso, assim pudemos avaliar caso a caso o desenvolver da possível aprendizagem, abordando especificamente os motivos pelos quais o material foi ou não sujeito de uma aprendizagem significativa.

Lembramos que nosso objetivo foi e é colaborar com as mudanças necessárias para as melhorias da educação em nosso país, e que com pequenos passos iguais a este, melhoraremos as condições de trabalho em nossas instituições de ensino, pois estamos elaborando bons materiais didáticos e divulgando-os com o intuito de, aos poucos, sensibilizar todos os docentes quanto a necessidade de buscarmos novas estratégias de ensino para com isso, mostrar a outra face do ensino de Física: a Física prazerosa que transforma o nosso mundo dia após dia com muitas descobertas. Mudar é difícil, porém cada vez mais necessário, principalmente quando estamos lidando com jovens que têm acesso à toda uma gama de informações e que adoram usufruir das novas tecnologias.

4.2 Metodologia

O nosso trabalho foi apresentado através de um curso de quarenta (40) horas para docentes, sendo dezesseis (16) horas a distância. Na parte a distância, os professores tiveram que preparar um plano de aula sobre ondas e realizar leituras dos textos propostos pelo curso. As outras vinte e quatro (24) horas foram presenciais, realizadas em seis (6) encontros, nos quais foram respondidos questionários, elaborados mapas conceituais, manipulados fenômenos de difração e interferência com uso de *laser* e fendas entre outros materiais, sendo que um bom período (aproximadamente dezesseis (16) horas) foram trabalhados no *software* IMZ com guias experimentais que instigavam a procura por mais conhecimento.

Foi escolhido o professor de Física de escolas públicas como público-alvo deste trabalho por muitos motivos:

- Oferecer a nova metodologia em primeira mão para quem precisa do curso;
- Oportunizar momentos de troca de conhecimentos e experiências;
- Vivenciar as dificuldades apresentadas por todos nas escolas;
- Mostrar que é possível utilizar as ferramentas tecnológicas, o computador, programas que estão à nossa disposição em nossas escolas;
- Por acreditar que essa é a maneira mais eficaz de divulgar nosso trabalho em outros municípios, pela propaganda direta.

O curso foi divulgado através de panfletos que foram enviados pelos “malotes”, correspondência interna da 6ª CRE com os estabelecimentos de ensino, para todas as escolas de Ensino Médio que representam esta coordenadoria, não tendo custo algum de inscrição para os docentes. As inscrições podiam ser feitas por telefone, fax ou *e-mail*. Tivemos oito professores inscritos, porém duas professoras nem chegaram a participar do curso.

O local de realização do curso foi a Escola Estadual de Ensino Médio Ernesto Alves de Oliveira, situada no Centro da Cidade de Santa Cruz do Sul – RS, por ser esta uma escola conhecida e de fácil acesso a todos, inclusive aos que moram em outros municípios e também por possuir uma ampla sala de informática (Figura 7) com quadro branco e treze (13) computadores ligados à rede banda larga de *internet*.



Figura 7- Fotos do laboratório de informática da escola onde ocorreu o curso

Inicialmente foi aplicado um pré-teste (questionário que aborda conhecimento gerais e específicos do professor) e também foi proposto aos professores, que individualmente ou em duplas elaborassem um mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios (ondas). Este instrumento serviu para averiguar se o material proposto no curso tem um potencial significativo. Durante o curso trabalhamos principalmente interferência na luz, através do *software* IMZ, utilizando textos de apoio e guias experimentais que mostram fenômenos da Física Clássica e Quântica.

No término do curso foi aplicado um pós-teste, que é igual ao aplicado no início do curso. Os professores fizeram ainda outro mapa conceitual com o mesmo enfoque do inicial, para constatar se houve uma aprendizagem significativa (fortalecimento de seus subsunçores) com a utilização do material proposto no curso.

4.2.1 Aplicação da Metodologia

Tendo encerrado as inscrições, pedimos através de *e-mail*, ligações ou fax que cada participante elaborasse um plano de aula sobre fenômenos ondulatórios (ondas) para analisar e fazer então as alterações necessárias nos materiais que serão utilizados e torná-los mais eficazes no processo de aprendizagem. Neste mesmo contato com os participantes, entregamos um texto sobre mapas conceituais e a aprendizagem significativa de autoria do Professor Dr. Marco Antônio Moreira. Acreditava-se que a maioria dos participantes não

conhecia essa técnica utilizada para a avaliação e, como iríamos utilizar este método para averiguar se estava havendo aprendizagem, seria ideal que os professores tivessem a oportunidade de criar uma “espécie” de subsunção através deste organizador prévio.

4.2.1.1 Primeiro encontro: apresentação e questionário

Começamos nosso encontro com a apresentação de cada professor, na qual a maioria colocou o seu nome, cidade que mora e trabalha, qual escola trabalha, e turmas que leciona. Após a rápida apresentação do grupo, explicamos brevemente que trabalharíamos com o *software* IMZ, construiríamos mapas conceituais e responderíamos alguns questionários e guias experimentais. No primeiro momento responderíamos às questões pessoais/profissionais e questões de conhecimento em uma área específica da Física (Anexo B).

Na seqüência das atividades propostas estava a apresentação em lâminas sobre mapas conceituais, que foi elaborado com base no texto (Anexo A) e que os professores receberam dias antes do início do curso. Cada professor poderia comentar ou questionar dúvidas que apresentavam, pois quem não conhecia bem o assunto, teria, pelo menos, a oportunidade de fazer a leitura do texto. Apenas dois (Joana e Paulo), dos seis professores que participavam do curso, nunca tinham trabalhado com mapas conceituais.

Ainda neste encontro, houve a proposta da construção de um mapa conceitual sobre ondas, que poderia ser feito individualmente ou em duplas, porém cada mapa deveria ser apresentado pela(s) pessoa(s) que o elaborou (ver seção 5.3), sendo que a maioria dos professores tinha o material, ou seja, o seu plano de aula sobre fenômenos ondulatórios (ondas).

No final do primeiro encontro foi distribuído aos professores um texto sobre as principais propriedades dos fenômenos ondulatórios, principalmente o fenômeno de interferência da luz (Apêndice A) para leitura, sendo que deveriam trazer por escrito comentários e sugestões para sua melhoria. Também pedimos que analisassem a possibilidade de trabalhar em aula com esse texto, ou apenas como material auxiliar em elaborações de aula.

4.2.1.2 Segundo encontro: opiniões e observações de fenômenos ondulatórios da luz

Iniciamos este encontro sugerindo que cada professor relatasse seus comentários sobre o texto lido, dando sugestões para melhoria do material. A maioria achou que o mesmo era de fácil interpretação, podendo ser utilizado pelos alunos. Observou-se que dois professores não haviam lido o texto para o segundo encontro, porém, os mesmos foram alertados que poderiam trazer suas sugestões ou observações no próximo encontro.

Sugestões apresentadas pelos participantes sobre o texto de apoio I: Difração, Polarização e Interferência: Fenômenos Ondulatórios da Luz (Apêndice A):

- Professora Marta:

“Em relação ao uso do texto em sala de aula:

Acho que é possível usar o texto com os alunos desde que o professor trabalhe e explique anteriormente ou paralelamente o assunto, pois a linguagem é acessível, somente a parte das fórmulas é um pouco complicado atualmente porque os alunos vêm muitas vezes sem as noções básicas de matemática.

Conversei com os colegas professores da minha escola e solicitei que lessem o texto e emitissem um parecer sobre o mesmo, já que são eles que trabalham esta parte com os alunos e os mesmos colocaram que é muito difícil e não seria aconselhável usá-lo e se fosse usado seria como um texto complementar.

Gostaria de salientar que faz mais de 8 anos que trabalhei este assunto nas turmas que atuei por isso pedi ajuda dos colegas como também tentei convencê-los de participar do curso.”

- Professora Ana:

“O texto possui uma linguagem acessível tanto para alunos como para professores. Apenas acrescentaria mais ilustrações e sempre junto com as explicações no texto. Exemplo mostrar a ilustração da interferência construtiva juntamente com sua explicação, assim como a interferência destrutiva também.

Ao enriquecermos nosso trabalho com gravuras e ilustrações, conseguimos chegar até o nosso aluno, de maneira que a disciplina Física, torna-se mais atrativa e compreensível (possível).

Acredito que podemos citar os cálculos e fórmulas de intensidade das franjas de interferência, mas não cobrar este tipo de cálculo em avaliação ou como forma de punição e sim como desafios para alunos que desejam se aprofundar no assunto e praticar mais alguns exercícios.

Na parte do interferômetro, podemos colocar diversas figuras de acordo com os passos que deveremos realizar (acrescentando os espelhos, os detectores) na sequência para

demonstrar aquilo que está acontecendo e tornando mais compreensível o assunto para a conclusão de nossos alunos.”

- Professora Paula

“O texto está muito bom, claro e bem distribuído.”

- Professor Paulo

“Quando se está trabalhando em sala de aula, nem sempre é possível preparar um material aos alunos, pois exige tempo e, às vezes, não o temos. O resumo apresentado sobre difração, polarização e interferência com exemplos apresentados possibilita um bom embasamento teórico aos alunos.

Na interferência os exemplos são claros e fáceis de entender, o que não ocorre quando se começa a calcular o valor do comprimento de onda de luz. Para a abertura circular pode-se trabalhar o interferômetro de Mach-Zehnder com toda a sua teoria. Bom material aplicável para a sala de aula, laboratório com experiências práticas.”

- Professora Joana

“O texto está de fácil compreensão para alunos, porém no lugar do número a que se refere ao autor, deveria ser colocado o seu nome, pois dificilmente os alunos irão ficar virando a página e procurar na bibliografia a qual autor se refere aquele número.”

Dando continuidade ao curso e utilizando materiais de fácil acesso (*lasers*, lanternas, velas, pedaços retangulares de latas de refrigerante com um e dois pequenos orifícios circulares, retalhos de tecidos e alguns diapositivos de fenda dupla e tela emprestados do laboratório de Física da UFRGS) mostramos fenômenos de difração e interferência. Porém, o curso tem a pretensão de mostrar as grandes vantagens que o *software* IMZ nos oferece. Podemos abordar vários assuntos dos fenômenos ondulatórios clássicos como a superposição de onda, o valor da intensidade da fonte, o papel dos espelhos refletores e semi-espelhos, os fenômenos de interferência e difração. Quando o professor se mostrar preparado poderá utilizar este *software* para expor assuntos quânticos relacionados com os fenômenos ondulatórios, sendo eles o princípio da incerteza, o problema da medida e a superposição de ondas, questões estas que ficam difíceis de serem mostradas através dos métodos tradicionais.

Neste assunto mais especificamente, ficam claras as vantagens de trabalharmos no laboratório de informática com o *software* IMZ do que no laboratório experimental de Física, pois a construção de um interferômetro se torna cara e não nos oferece as vantagens que o *software* tem, como por exemplo a de trabalhar com fótons únicos, manutenção e manuseio.

Salientamos novamente que esse *software* foi construído num projeto custeado pela CNPq e coordenado pela professora Dra. Fernanda Ostermann e colaboradores do IF-UFRGS, com bases na versão de outro *software* do interferômetro de Mach-Zehnder, que porém não possuía polaróides e sua versão era apenas em inglês, este *software* foi até então utilizado especificamente para aula de física quântica no Mestrado Profissional do Ensino de Física.

Cada professor ocupou um computador e instalou o *software* pelo sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> ou utilizou o disquete que o continha. Alguns computadores o *software* não abriu, então pedimos ajuda à professora responsável pelo laboratório de informática e ela ajustou a resolução para 256 cores e assim o *software* funcionou.

Com uma transparência do IMZ (figura 8), mostramos ao grupo as ferramentas que o *software* apresenta, então cada um começou a explorar o interferômetro virtual. O passo seguinte foi apresentar um dos guias experimentais que seriam trabalhados por eles, no restante do tempo deste encontro.

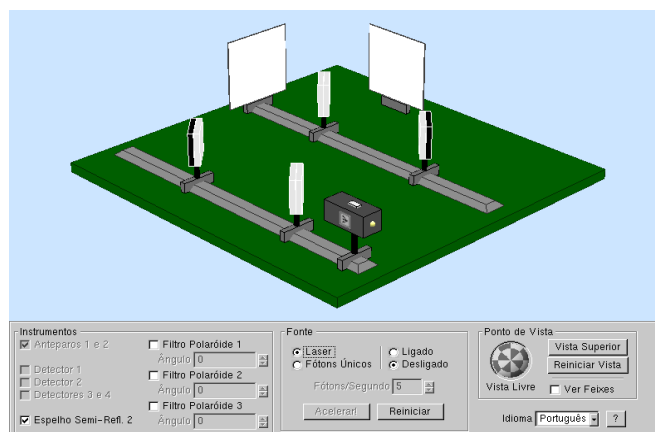


Figura 8 – Modelo da lâmina utilizada para explicação do IMZ aos professores cursistas

Para os encontros seguintes foram elaborados outros guias experimentais, nos quais, para alguns utilizamos fonte *laser* e filtros polaróides e outros utilizamos como fonte de luz fótons únicos, polaróides e detectores. Esses guias são encontrados no Apêndice B.

4.2.1.3 Terceiro, Quarto e Quinto encontros: utilização do *software* IMZ

Nesses encontros os professores trabalharam com o *software* (Figura 9) através de guias experimentais (Apêndice D), observamos muito interesse por parte dos professores que trocavam idéias entre si, faziam perguntas e eram muito participativos. Notava-se o entusiasmo dos mesmos quando conseguiam relacionar os conteúdos da física ondulatória que poderiam ser abordados com o uso deste programa.

No término do quinto encontro, sugerimos a leitura de outro texto sobre alguns dos princípios mais fundamentais da física quântica “à luz” do interferômetro de Mach-Zehnder Virtual (Apêndice C), que cada um ganhou fotocópia. Também pedimos como tarefa à distância: cada um deveria explicar como utilizaria o IMZ em suas aulas, mas nem todos os professores trouxeram essa atividade no último encontro.

Sugestões descritas pelos professores de uma aula usando interferômetro de Mach-Zehnder:

- Professora Ana

“Escolher opção para fonte Laser: podemos explicar o comportamento da luz como onda, porque ocorre o fenômeno da interferência que só ocorre com ondas.

Dualidade da luz onda-partícula

Ao selecionar a fonte fótons únicos, verificamos que o fóton sai e chega como partícula, mas com um grande número de fótons transmitidos, vemos que acontece uma interferência no anteparo. Assim concluímos que a luz se comporta ora como partícula e ora como onda. Na saída e chegada a partícula, e no caminho percorrido se comporta como onda.

Princípio da Incerteza

Quando os fótons de luz saem da fonte como partícula, acrescentando o detector 1, temos certeza do caminho percorrido pelo fóton, e nos anteparos não acontece interferência porque os fótons emitidos pela fonte, metade passa pelo caminho que tem o detector 1, onde a partícula é contada e destruída; e a outra metade segue o outro caminho e chega aos anteparos, mas não há interferência.

Assim, quando medimos o fóton, destruímos a interferência, mede-se um e destrói-se o outro.

Problema da medida

Ao seleccionar a fonte fótons únicos e o detector 1 percebemos que há um problema de medida, pois o detector sempre será do ponto de vista macroscópico e os fótons microscópicos. Sendo assim os fótons são detectados e destruídos, e por consequência não ocorre a interferência.”

- Professor Pedro

“Como justificar para o aluno do Ensino Médio a dualidade: partícula-onda.

Se usar o laser, percebemos a interferência construtiva e destrutiva na anteparo devido à uma sobreposição de ondas, através de uma divisão no caminho percorrido com reflexão e transmissão. Não consigo separar o momento da emissão nos dois caminhos. Mais ainda, se usarmos fendas horizontais consigo observar um padrão de interferência, se uso fendas verticais não consigo ter esse padrão.

Dessa forma, consigo justificar o laser somente como padrão de onda. Partícula não escolhe a posição da fenda para formar o padrão de onda.

Se uso o fóton, não tenho a emissão simultânea, observada pelo detector, dessa forma a luz se comporta como onda no caminho dos detectores e refletores, no entanto pontos intercalados se manifestam nos anteparos, tendo comportamento de partícula. Nos polaróides o fóton tem a mesma manifestação que o laser, sendo polarizada em 0° e 180° .”



Figura 9 – Fotos tiradas durante o curso

4.2.1.4 Sexto encontro: questionário e avaliação sobre o curso

Aplicamos novamente o questionário (Anexo B) que continha questões sobre conhecimento na área da Física, o pós-teste.

Em seguida, pedimos que cada participante fizesse uma avaliação por escrito sobre o curso, e depois distribuimos lâminas e canetas para que cada participante criasse seu mapa conceitual (ver seção 5.3) sobre fenômenos ondulatórios (ondas) e os apresentasse ao grupo. Para finalizar, apresentamos um mapa conceitual (Apêndice E) que construímos também sobre ondas e enfim agradecemos a presença e as contribuições que todos deram nos referidos encontros.

Avaliação do curso feito por cada professor cursista, alguns não constava o nome:

Faça uma avaliação deste curso, pontos positivos e negativos.

- Professor Pedro

“Ótimo trabalho: antes era muito difícil demonstrar para o aluno qualquer forma de interferência como padrão onda.

A partir do momento que puder abstrair a idéia da emissão de fóton dentro de padrões de superposição de onda, com o IMZ, ficou mais fácil argumentar para o aluno a própria evolução dos modelos atômicos.

Sugestões para outros trabalhos:

*Partículas nucleares: mésons e pósitrons
Como relacioná-los na quântica.”*

- Professor

“O curso veio a contribuir para a minha prática, com uma idéia nova para contribuir nas aulas. O interferômetro é uma pratica visual, onde podemos ver o caminho que a luz pode seguir.

Nos livros que se tem são raros os que falam da polarização ou tem imagens de como a luz se comporta. E aqueles que falam sobre o assunto não chegam à escola, devido ao custo.

Aprendi muito. Parabéns pela iniciativa de dar o curso.”

- Professor

“Este curso serviu para mim como um fator motivador para buscar mais sobre a física quântica, tão esquecida ou deixada de lado por mim devido à grande ênfase que

sempre dei em trabalhos a física mecânica. Devido à grande falta de tempo, não pude estudar durante o curso, por isso acredito que tive um rendimento razoável neste curso.

Se tivesse buscado mais sobre este assunto, poderia ter contextualizado mais, mas devido à minha carga horária de trabalho não obtive um desempenho ótimo.

Acredito que a professora se esforçou bastante para transmitir os conceitos e práticas, mas devido à falta de conhecimento (de lembrar sobre este assunto) acho que fui prejudicada no meu rendimento.”

- Professor (a)

“Gostei da parte inicial, com demonstrações feitas com Laser e fonte de luz.

É um assunto difícil, que exige que nos dediquemos ao máximo, desde o início.

Bom o emprego de tecnologia, mas distante da realidade das Escolas e dos professores.

Bom o empenho da professora Simone, tanto nas explicações como no material disponibilizado durante as aulas.”

- Professor (a)

“Achei muito bom, pois tive oportunidade de aprender, trocar idéias e crescer como profissional.

Sempre sinto a necessidade de participar de grupos que estudam assuntos referentes à física.

A Simone soube fazer bem o papel de “professora”, não respondia diretamente, mas fazia com que a gente pensasse e construísse os conceitos.

Minha sugestão seria que tivesse grupo permanente de estudo e discussão sobre assuntos referentes à Física, mas também tenho clareza que é quase impossível, pois a maioria dos meus colegas acha que não tem tempo.”

- Professora Paula

“Foi extremamente interessante participar destes momentos, pois, além, dos conhecimentos que adquiri, houve diversas trocas de experiências com colegas da área que atuam em outras escolas.

Quando estudante de Ensino Médio, tive aulas de ondulatória que deixaram a desejar. No ensino superior, não foi muito diferente, portanto é um assunto que assusta. Física quântica foi muito pouco trabalhada, logo esse curso me ajudou bastante.

Ficou difícil comparecer a todos os encontros devido aos compromissos escolares. O período de realização não foi muito feliz. Teria sido mais bem aproveitado se fosse no primeiro semestre.

De qualquer forma, foi muito bom!

Desejo-te muito sucesso!”

5 RESULTADOS

Para averiguar se nosso material foi potencialmente significativo adotamos dois métodos de avaliação: um deles é sob forma de um questionário (pré-teste e pós-teste), que foi aplicado no primeiro encontro para sabermos como prosseguir com o curso, sendo também respondido no último encontro, a fim de analisarmos se houve progresso no que diz respeito à aprendizagem. Outro método ou técnica de avaliação que também foi proposta no primeiro e último encontro é a que propõe a construção de mapas conceituais sobre os fenômenos ondulatórios, mais especificamente interferência.

Nos próximos parágrafos descreveremos dados referentes a cada participante e seu local de trabalho (conforme respostas do professor participante). Analisaremos também os seus questionários e mapas conceituais, finalizando com o depoimento, uma espécie de avaliação do curso escrita pelos professores participantes do mesmo. Para melhor analisarmos as questões contidas no questionário aplicado no primeiro (pré-teste) e no último (pós-teste) encontro, optamos por abordar as duas respostas em seqüência, para melhor visualização e análise. Essa opção foi também utilizada para os mapas conceituais.

5.1 Análise do questionário com dados pessoais e profissionais

5.1.1 Informações contidas no questionário respondido pela professora Ana

O primeiro questionário analisado é da professora Ana, cuja formação é em Matemática Licenciatura Plena com habilitação para lecionar Física no Ensino Médio, é formada há cinco anos e já leciona a disciplina de Física há sete anos. Atualmente faz um curso de especialização na área de Ensino de Matemática e trabalha aproximadamente quarenta horas semanais, lecionando Física nas oitavas séries do Ensino Fundamental e nos primeiros anos do Ensino Médio.

Apesar de algumas escolas de Ensino Médio possuírem laboratório de informática, a escola onde Ana trabalha não possui e, ainda, o laboratório de física é precário e mal-organizado. Ela salienta que em sua escola há apenas dois microcomputadores na biblioteca onde todos têm acesso.

Em aula, com suas turmas, ela adota livro didático para consultar e propor exercícios de revisão e como tarefa para casa, pois sua escola assim prefere. Ao preparar sua aula, Ana utiliza vários livros didáticos e às vezes faz algumas consultas em sítios relacionados à Física, em sua casa, pois possui um microcomputador com acesso à *internet* discada. Quando perguntado a ela se algum aluno já a questionou com relação a conteúdos de Física Moderna e se a mesma trabalha com esses temas mais atuais, ela respondeu que nunca foi abordada pelos alunos com questões sobre estes temas e que não os trabalha porque tem somente alunos de oitava série e primeiro ano. Salientamos que a edição mais recente do livro didático da autora Beatriz Alvarenga (2008) já apresenta temas de Física Moderna.

5.1.2 Informações contidas no questionário respondido pela professora Marta

Outro questionário analisado é o da professora Marta, que tem sua formação em Física Licenciatura Plena, é licenciada há aproximadamente vinte anos e atua como professora de Física este mesmo período, é especialista na área de Educação e atualmente trabalha 22 horas semanais com primeiros anos do Ensino Médio e com progressão, na qual trabalha com todo o Ensino Médio.

A escola em que trabalha possui laboratórios de física e de informática. O laboratório de física possui os conjuntos Bender da mecânica dos sólidos, eletricidade A e B, óptico, porém acrescenta que faltam muitas peças e o laboratório de informática possui oito microcomputadores, todos com acesso à *internet* banda larga.

Em aula, com suas turmas, ela adota livro didático. Porém o preço do livro interfere muito na escolha, explica ela, por seus alunos não possuírem muitas condições financeiras. Ela ainda diz: *“Adoto livros, pois acho importante o aluno ter acesso à leitura em livros e não concordo muito em tirar fotocópias de livros, assim posso explicar e construir alguns conceitos e solicitar para que leiam em casa”*.

Para preparar suas aulas Marta, utiliza vários livros didáticos, ela cita que os mais pesquisados são Física de Olho no Mundo do Trabalho, de Antônio Máximo e Beatriz Alvarenga, Física Conceitual de Hewitt, As Faces da Física, de Guimarães, Física, de Alberto Gaspar, Física Completa, de Bonjorno, Física, de Beatriz Alvarenga e Antônio Máximo, Física, do Paraná, entre outros. A professora também consulta revistas, jornais e sítios da *internet* (ela possui um microcomputador com acesso à *internet* em sua residência) para preparar seus planos de aulas. Marta adora livrarias e, sempre que pode, compra um bom livro, tanto na sua área como em outras de seu interesse pessoal. Ainda disse: “*Prefiro comprar livros a móveis e utensílios que decorem minha casa*”.

Ao responder uma das questões do questionário que se referia à abordagem de conteúdos referentes à física quântica em suas aulas, ela respondeu: *Acho que não trabalho a física quântica com meus alunos do 1º ano do Ensino Médio, pois não tenho claro onde entra a física quântica em Movimento Retilíneo Uniforme, Movimento Retilíneo Uniformemente Variado, Movimento Circular, Leis de Newton, entre outros. Mas quando algum aluno vem com uma questão eu tento e sempre procuro pesquisar com eles.*

Percebemos durante o desenrolar do curso o interesse e a disposição que esta professora tem em ampliar e fortalecer seus subsunçores. Ela era uma das que mais se empenhava em realizar as atividades propostas durante o curso e à distância. Podemos dizer que colaborou muito, com idéias, sugestões e perguntas e obteve uma aprendizagem significativa, pois o curso a ajudou a entender e esclarecer algumas das suas dúvidas ainda existentes.

5.1.3 Informações contidas no questionário respondido pela professora Paula

A professora Paula é formada há vinte e dois anos e leciona Física há aproximadamente vinte quatro anos. Atualmente trabalha quarenta horas semanais, sendo que somente seis horas em sala de aula com turmas do segundo ano do Ensino Médio. Ela tem sua formação na área de Física Licenciatura e também já fez um curso de especialização na área do Ensino. Para preparar suas aulas, utiliza os livros didáticos dos seguintes autores Gerson Herschowitz, Wilson Carron/ Osvaldo Guimarães e Nicolau/ Toledo/ Ramalho e apesar de ter

em sua casa acesso à *internet* ela não faz pesquisas em sítios e também não utiliza como recurso jornais e revistas. Coloca ainda que não tem o hábito de fazer leituras. Suas turmas não utilizam livros didáticos, e, segundo o programa de conteúdos abordados no currículo da escola em que trabalha, não constam conteúdos de Física Moderna. Ressalta, ainda, que não domina este conteúdo e salienta que não conseguem “vencer” os conteúdos programados.

A escola em que Paula trabalha tem um ótimo laboratório de física que é pouco usado pelos professores. Segundo um comentário feito por ela “dos seis professores que lecionam Física na escola em que trabalho, apenas dois são formados em Física, os outros são formados em Biologia, Química e Matemática”. Ela coloca esse fato como uma das principais causas de não usarem o laboratório de física. Sua escola também possui um laboratório de informática com treze microcomputadores, com *internet* banda larga e há também microcomputadores na biblioteca, secretaria e no CPM (Círculo de Pais e Mestres), todos com acesso à *internet*.

5.1.4 Informações contidas no questionário respondido pela professora Joana

A professora Joana é formada há cinco anos em Matemática Licenciatura Plena com habilitação para lecionar Física no Ensino Médio e somente no ano de 2006 começou a lecionar a disciplina de Física nos primeiros e terceiros anos do Ensino Médio, antes apenas trabalhava no Ensino Fundamental com a disciplina de Matemática. Trabalha quarenta horas semanais e, apesar de possuir um microcomputador, ainda não tem acesso à *internet*, por enquanto apenas o usa para elaborar suas avaliações. Ao preparar seus planos de aula, ela utiliza os livros didáticos como, por exemplo do Bonjorno, Clinton e Beatriz Alvarenga bem como utiliza revistas. Não adota livro didático.

Na escola em que trabalha, o laboratório de física é utilizado como sala de aula, pois a escola não possui salas de aula suficientes para a demanda e também não é utilizado pelos professores pelo fato de faltar grande parte dos materiais necessários, sendo que os mesmos devem comprar os materiais que faltam se quiserem utilizar os experimentos que este laboratório oferece. Quanto ao laboratório de informática, já existiu um com seis computadores, porém como não havia nenhum professor responsável, os alunos os deixaram

em más condições de uso. Hoje a escola só possui dois microcomputadores com acesso à *internet*, um na secretaria e o outro na sala da supervisão.

5.1.5 Informações contidas no questionário respondido pelo professor Pedro

O professor Pedro é formado em Química Licenciatura Plena e Bacharel e leciona Química e Física há doze anos. Além de professor, trabalha com serviços terceirizados e é mestre no curso de Química há seis anos. Ele trabalha quarenta e duas horas semanais em sala de aula com alunos dos três anos do Ensino Médio e para preparar suas aulas consulta os livros didáticos, cujos autores são: Beatriz Alvarenga, Wilson Carron e Osvaldo Guimarães, Toledo e Alberto Gaspar, além disso, também utiliza o laboratório de informática da sua escola com os alunos para trabalhar com o *software* Edison e pesquisas em sítios da Física e Química.

A escola em que trabalha possui um laboratório de Ciências (Física/ Química/ Biologia), porém não se encontra em condições de uso e um laboratório de informática com vinte microcomputadores, sendo que todos possuem acesso à *internet*. O professor Pedro adota livro didático para que o aluno tenha uma base de pesquisa e referência, e além de trabalhar os conteúdos da Física Clássica aborda alguns conteúdos da Física Moderna, como modelo atômico e dualidade onda-partícula.

5.1.6 Informações contidas no questionário respondido pelo professor Paulo

Relataremos algumas descrições do Professor Paulo que tem sua formação em Matemática Licenciatura Plena, é formado há cinco anos e leciona as disciplinas de Matemática e Física, sendo que leciona Física há três anos. Atualmente faz um curso de especialização na área de Ensino de Matemática, ele trabalha cinquenta e quatro horas semanais.

Prepara seus planos de aula para toda semana aos domingos, pois aos sábados tem aulas do curso de especialização. Para preparar suas aulas de Física, consulta os livros didáticos dos autores Bonjorno e Clinton. Também consulta algumas revistas e jornais

assinados pela escola. Não faz pesquisas em sítios da Física, pois apesar de ter um microcomputador, não tem acesso à *internet* e na sua escola não há laboratórios de física e nem de informática.

Quando perguntado se adota livros didáticos e aborda assunto da Física Moderna, as respostas foram não. Apenas comentou que por ser formado em Matemática teve, na sua graduação, apenas uma disciplina de Física e agora nesses últimos anos pelo fato de trabalhar Física nos três anos do Ensino Médio procura fazer cursos para preencher um pouco da grande lacuna de conhecimento nessa área. Também por isso, nunca trabalhou Física Moderna com seus alunos.

5.2 Análise do questionário sobre noções básicas de física quântica

Abaixo temos o questionário aplicado sobre noções básicas de física quântica, que foi respondido antes e depois da realização do curso, a primeira resposta se refere ao pré-teste e a segunda resposta se refere ao pós-teste. Para melhor analisar as respostas de cada questão foram colocadas uma abaixo da outra e para visualizar o desempenho de cada professor na referida questão também optamos por colocar as respostas de todos os professores para cada questão.

Lembramos que o fator que mais nos motivou a utilização deste questionário foi por ele já ter sido utilizado em aulas do nosso mestrado e assim o critério de validação do mesmo já o tornava aceitável. Portanto, somente analisamos as questões (Q1, Q2, Q3, Q4, Q6, Q7, Q8, Q9, Q10 e Q15) que condiziam com nosso trabalho, para a elaboração de nosso capítulo final.

Q1. Você estudou física quântica no ensino superior? Em caso afirmativo, qual(is) a(s) disciplina(s) cursada(s)? Que livros você leu e/ou estudou?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não me recordo que livros utilizei sobre esse assunto. Só lembro que foi trabalhado, mas vagamente.

Segunda resposta:

Durante o meu Ensino Superior estudei diversos conceitos físicos, mas devido à quantidade de anos que já faz, tenho guardado em minha memória, aqueles conceitos que já apliquei em sala de aula e aqueles que realmente tiveram significado ou foram bem trabalhados por meus professores.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Teoria do éter, não lembro os livros que li.

Segunda resposta:

Lembro somente que estudamos a teoria da relatividade, pois isto faz muito tempo.

Professora Paula

Primeira resposta:

Sim, noções. Faz muito tempo, não lembro da disciplina. Usamos livros dos autores Resnick/ Halliday.

Segunda resposta:

Como faz muito tempo, tenho vagas lembranças do que estudei no ensino superior. Não lembro das disciplinas, mas sei que tive Mecânica Quântica de livros, lembro Resnick/Halliday e polígrafos.

Professora Joana

Primeira resposta:

Estudei alguma coisa na disciplina de Físico-Química. Não li nenhum livro.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Pouca coisa.

Segunda resposta:

Não.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não.

Q2. Seus alunos de Ensino Médio costumam lhe fazer perguntas sobre Física quântica? Em caso afirmativo, o que eles querem saber?**Professora Ana**

Primeira resposta:

Não, pois ainda são imaturos e não dominam ainda os conceitos de física e têm medo em grande parte desta disciplina.

Segunda resposta:

Geralmente os meus alunos são de 1º ano e, devido ao medo, imaturidade, só fazem perguntas relativas aos conteúdos trabalhados. Em todo meu tempo de sala de aula, apenas uns 4 alunos já tiveram curiosidade e interesse de perguntar sobre este assunto, sendo que o mais relevante apresentado por eles é a Teoria da Relatividade.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Atualmente o que mais me perguntam é sobre a fibra óptica, funcionamento de celulares...

Segunda resposta:

Fazia 8 anos que estava fora da sala de aula e agora que voltei o que os alunos mais perguntam é como funciona e como acontece a transmissão dos dados pelos celulares e a internet.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não.

Segunda resposta:

Fiquei algum tempo fora da sala de aula e nesses últimos meses em que retornei não recebi nenhum questionamento sobre o assunto.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não me perguntaram nada até o momento.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Sim, quantização de energia.

Segunda resposta:

Não.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não, somente comento quando sai em alguma revista sobre o assunto.

Q3. Você já leu, por interesse próprio, algum livro sobre temas da Física Moderna? Em caso afirmativo, qual(is)?**Professora Ana**

Primeira resposta:

Alguns, mas devido ao fator tempo quase não consigo me aprofundar neste conteúdo, somente naqueles que preciso ou vou trabalhar.

Segunda resposta:

Devido ao pouco tempo que possuo, procuro ler e estudar sobre os conceitos que trabalho em sala de aula, quase não sobra muito tempo para estudar a Física Moderna. Sendo assim, li pouco e, conseqüentemente tenho pouco domínio sobre este assunto.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Acho que devo ter lido.

Segunda resposta:

Lembro que já li livros sobre temas da Física Moderna, mas não lembro os títulos.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não.

Segunda resposta:

Não, praticamente não faço leituras.

Professora Joana

Segunda resposta:

Não.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Sim – “A Energia” não lembro o autor.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não.

Q4. Se você pudesse apontar um “experimento” (real ou imaginário) significativo da física quântica, qual você indicaria?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não lembro.

Segunda resposta:

Não sei opinar.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Apontaria o experimento do software do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não sei responder.

Segunda resposta:

O trabalho que fizemos com o software do interferômetro de Mach-Zehnder, foi para mim um excelente instrumento para compreensão do princípio da dualidade onda-partícula e da interferência.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

A experiência da fenda, e agora o interferômetro de Mach-Zehnder.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

IMZ – fóton

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Somente o do laser ou de fonte de luz.

Q5. Você já ouviu falar em função de onda no contexto da física quântica? Em caso afirmativo, o que ela significa para você?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não lembro.

Segunda resposta:

Não lembro.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Acho que não.

Segunda resposta:

Sim.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não. Não significa nada.

Segunda resposta:

Sim. Descobriu-se que a amplitude elevada ao quadrado dá a intensidade da onda.

Professora Joana

Primeira resposta:

Na faculdade, mas não lembro o que foi discutido.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Sim, para entender a velocidade de propagação das ondas.

Segunda resposta:

Sim: comportamento e padrão de onda, a partir das funções de ondas podemos “definir” a intensidade de ondas.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q6. As grandes teorias da Física são formalizadas em termos de um determinado número de postulados ou leis fundamentais. Por exemplo, na relatividade restrita temos dois postulados, a partir dos quais uma série de conseqüências, previsões teóricas, concepções de experimentos, aplicações são obtidos. Ou na mecânica clássica, baseada em 3 leis do movimento. Você saberia enunciar algum(ns) *postulado(s)* da física quântica?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não.

Segunda resposta:

Não recordo exatamente os nomes destes postulados, pois li pouco e ainda não os contextualizei.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Postulado de Einstein (que a luz apresentava aspectos corpusculares e ora ondulatórios) – dualidade onda-partícula para a luz.

Broglie postulou que há uma simetria entre o comportamento corpuscular das ondas luminosas com o comportamento ondulatório do elétron nas órbitas de Bohr, estabelecendo assim que não somente a luz, mas que qualquer partícula ou corpúsculo com massa e velocidade tem um comprimento de onda associado – ora comprimento de onda de matéria ou comprimento de onda de de Broglie.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Einstein postulou que a luz apresentava ora aspectos corpusculares e ora aspectos ondulatórios, introduzindo assim, a dualidade onda-partícula para a luz.

De Broglie postulou uma simetria entre o comportamento corpuscular das ondas luminosas como o comportamento ondulatório do elétron.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

- *Dualidade onda-partícula.*
- *Princípio da incerteza.*
- *Problema da medida.*

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

- *Relatividade do tempo.*
- *Padrão de onda, a intensidade.*
- *Padrão de interferência.*

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

- *Dualidade onda-partícula.*
- *Princípio da incerteza.*
- *Problema da medida.*

Q7. A figura é uma vista superior do aparato usado pelo médico Thomas Young - em 1801 - para realizar seu famoso *experimento da fenda dupla* com a luz. S_0 é uma pequena fenda simples em um anteparo, e S_1 e S_2 constituem uma fenda dupla, sobre um segundo anteparo, situado entre o primeiro e a tela. (i) O que foi observado por ele na tela que comprovava fortemente a teoria *ondulatória* da luz? (ii) Qual a finalidade do anteparo

com a dupla fenda? (iii) Qual a finalidade do anteparo com apenas uma fenda? (iv) Que fenômenos ondulatórios “estão por trás” do resultado observado na tela?

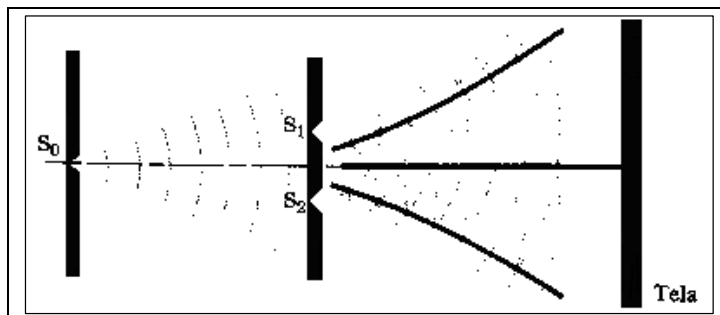


Figura 1- Experimento da Dupla Fenda

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

O que foi observado por ele é o fenômeno da Interferência, que só ocorre com ondas. O anteparo de duas fendas serve para formar 2 ondas que se propagam para que ocorra o fenômeno da interferência no anteparo (tela). Já o anteparo de uma fenda serve para tornar a onda (luz) coerente.

Os fenômenos observados são a propagação da luz e a interferência de duas fontes (ondas) que se propagam.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

(i) Observou na tela uma seqüência de faixas claras e escuras. As claras com brilho de intensidades diferentes. No centro uma faixa de brilho mais intenso e percebeu-se que as outras faixas claras iam perdendo a intensidade do seu brilho à medida que se encontravam mais afastadas do centro da tela, isto condizia com uma interferência.

(ii) A luz ao passar por S_0 difratou-se, chegando como ondas curvas em S_1 e S_2 , passando pelos seus orifícios S_1 e S_2 , onde ocorreu superposição das ondas provenientes de S_1 e S_2 .

(iii) *Serve para a luz ficar coerente.*

(iv) *A interferência.*

Professora Paula

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

(i) *Que a propagação da luz, não sendo retilínea, passou pelo anteparo de fenda dupla, atingindo a tela e fazendo aparecer nela faixas claras e escuras, com brilhos de intensidades diferentes, as quais chama-se franjas de interferência.*

(ii) *A dupla fenda tem como objetivo gerar a superposição de ondas e como consequência, as interferências construtiva e destrutiva.*

(iii) *A fenda única tem como objetivo tornar a luz coerente.*

(iv) *Os fenômenos envolvidos são a difração e a interferência.*

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

I – Observou-se franjas de interferência.

II – Se a luz não tivesse o comportamento de onda ela passaria pela fenda, encontraria a outra parede e não aconteceria a difração. Como a luz tem comportamento ondulatório, ela vai passar pelas fendas S_1 e S_2 onde ocorre a superposição de ondas e temos na tela franjas de interferência.

III – A finalidade do anteparo com uma fenda é que ela ficasse com coerência.

IV – Superposição de ondas, interferência construtiva e destrutiva.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Anteparo com 1 fenda – estabelecer o momento/fase.

Anteparo com 2 fendas – estabelecer o momento da superposição de fase.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q8. A partir do experimento de Young e de outros que se seguiram na primeira metade do século XIX, a idéia de que a luz é algum tipo de onda foi se firmando. Durante a segunda metade desse século, acreditou-se cada vez mais e foi comprovado, sistematicamente, a partir do trabalho experimental de Hertz (1887), que a luz pode ser considerada uma *onda eletromagnética*. No entanto, a partir do trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico (1905), começou a vingar uma renovada *teoria corpuscular*, que considerava agora a luz como sendo formada por “corpúsculos”, denominados, mais tarde, *fótons*. Considere novamente o experimento da fenda dupla. (i) Se ele fosse realizado com um feixe luminoso monocromático tão fraco que apenas um *único fóton* incidisse no anteparo de cada vez (*feixe monofotônico*), o que você acha que seria observado na tela após algum tempo decorrido?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Acredito que apareceria um fóton de cada vez em cada fenda incidindo sobre o anteparo.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Seriam observados os feixes na tela.

Segunda resposta:

No início apareceriam alguns pontos no anteparo e após decorrido algum tempo, observaria a interferência (difração construtiva e destrutiva).

Professora Paula

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

A princípio seriam notados pequenos pontos soltos na tela, mas após um grande número de impactos, a tela apresentaria círculos concêntricos, ora luminosos, ora não, apresentando um padrão de interferência.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Vários pontos que formam uma figura com interferência construtiva, superposição.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não teria padrão de onda.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q9. Suponha agora que realizássemos o experimento da fenda dupla com um feixe de elétrons substituindo o feixe luminoso (e que retirássemos o anteparo de fenda única do aparato da figura 1). Suponha também que a superfície da tela tenha sido pintada com um material sensível ao elétron, cujo impacto produz um pequeno ponto na tela. O que você acha que seria observado?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Acho que aconteceria a mesma coisa que aconteceu na Q8, pois o feixe de elétrons atua como um feixe de fótons.

Professora Paula

Primeira resposta:

Dois pontos apenas.

Segunda resposta:

A tela apresentaria direto (diferente da emissão de fótons) os círculos concêntricos, ora luminosos, ora não, apresentando novamente o padrão de interferência.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Vários pontos, um do lado do outro, ou até um sobre o outro, pois qualquer partícula ou corpúsculo com massa e velocidade tem um comprimento de onda associado.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Teríamos dois padrões de onda definidos.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q10. Na questão anterior, o que você acha que seria observado na tela se o feixe luminoso monocromático fosse substituído por um feixe mono-energético de *électrons* (todos de mesma energia), tão pouco intenso que apenas um *único électron* incidisse no anteparo de fenda dupla? (OBS: Considere novamente que o anteparo de fenda única tenha sido retirado, e que a tela tenha sido pintada com material sensível aos impactos de *électrons*).

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Acho que aconteceria a mesma coisa que aconteceu na Q8, inicialmente algumas manchas (pontos) e após a interferência.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não faço idéia.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Uma difração.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não apareceria nenhum padrão de interferência.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q11. Costuma-se considerar elétrons, prótons, nêutrons e outros objetos microscópicos como partículas. (i) Em sua opinião, quais são as propriedades corpusculares características e essenciais desses objetos? (ii) De que maneira essas propriedades se manifestam no mundo real?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

As propriedades e características essenciais dos elétrons, prótons e nêutrons, são suas cargas elétricas que a cada momento estão se manifestando no nosso dia-a-dia, atraindo, repelindo, provocando acidentes, fenômenos e diversas situações do nosso dia-a-dia.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

(i) Que o corpúsculo “tem” massa e velocidade, tem um comprimento de onda associado.

(ii) Se manifestam ora como comprimento de onda de matéria ora como comprimento de onda de De Broglie.

Professora Paula

Primeira resposta:

Ter massa...

Segunda resposta:

São partículas com massa, velocidade.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Tem como características a forma como se movimenta sua massa, velocidade.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

- As principais propriedades: intensidade de energia e rebaixamento nuclear, transformando um núcleo, primeiramente “imexível”, num núcleo capaz de apresentar partículas: Quarks.

- Através de partículas radioativas.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q12. Você diria que os objetos microscópicos mencionados na questão anterior poderiam também exibir, sob certas circunstâncias, propriedades tipicamente ondulatórias? De que maneira você acha que tais propriedades se manifestam no mundo real?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Podemos observar através dos experimentos realizados com o interferômetro que os objetos microscópicos apresentados na questão anterior podem apresentar propriedades tipicamente ondulatórias, mas não consigo relacioná-las com o nosso mundo real.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Acho que sim, podendo possuir propriedades ondulatórias.

Segunda resposta:

Sim, na difração – Dualidade onda-partícula.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não faço idéia.

Segunda resposta:

Sim, como observamos nas práticas que fizemos utilizando o software do interferômetro.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Sim. O elétron, num circuito elétrico ao passar por um filamento de lâmpada produz luz e essa luz é transmitida com um comportamento ondulatório.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Energia, a partir de um núcleo atômico, manifestação de partículas – emitem ondas eletromagnéticas.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q13. Livros didáticos frequentemente mostram várias representações do átomo. Você já deve ter visto isso. Qual (ou quais) dessas representações se mantêm “vivas” em sua mente? Você a(s) considera “correta(s)”? O que significa para você a palavra “correta” neste contexto?

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Acredito que os livros didáticos apresentam uma representação do átomo o mais próximo possível do real, assim como os modelos mais antigos eram o que o homem dominava em termos desses conceitos. Hoje em dia sabemos que os elétrons giram em torno do núcleo numa região chamada eletrosfera e não soltos de uma região como o pudim de passas, proposto por outro físico, antes do modelo atual.

Professora Marta:

Primeira resposta:

São as representações que aparecem, mas não são corretas, pois, o átomo não é plano, deveria aparecer tridimensional.

Segunda resposta:

A representação que sempre vem à minha mente é aquele modelo linear (plano) quer dizer, o núcleo no centro e em volta a eletrosfera. Acho que não é a mais correta, pois o átomo é tridimensional e está em constante movimento. A palavra correta seria para mim o mais parecido com o real.

Professora Paula

Primeira resposta:

Um núcleo central com elétrons girando, cada um em sua órbita, ao redor desse núcleo.

Se é correta, não sei, mas acho aceitável.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Núcleo onde temos os prótons e na eletrosfera onde se encontram os elétrons, sendo que hoje existem, ainda, outros elementos microscópicos que formam o átomo.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Modelo atômico de Bohr – Complementado por de Broglie – órbitas circulares com comportamento ondulatório.

Elétrons: partícula – fazendo um movimento ondulatório em órbitas circulares.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q14. Comente a seguinte afirmativa: “A Física Clássica (mecânica newtoniana +eletromagnetismo de Maxwell) é incapaz de explicar a estabilidade atômica”.

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não consigo opinar sobre este assunto.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não sou capaz.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Porque a relação tempo/posição nos permite (aplicar) afirmar exatamente o momento fóton, mesmo tendo um comportamento corpuscular.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Q15. A Mecânica Quântica, de Schrödinger, Heisenberg, Dirac e outros, trouxe novas idéias sobre o mundo microscópico. Em particular, permitiu uma melhor compreensão da noção conhecida como dualidade onda-partícula, originada dos trabalhos pioneiros de De Broglie, Compton e outros na década de 1920. (i) Qual seria sua versão pessoal do enunciado da dualidade-partícula? (ii) Qual a relação famosa que expressa

matematicamente a dualidade onda-partícula? (iii) Cite um exemplo de experimento capaz de servir como comprovação da dualidade onda-partícula. (Adaptado de questão do Exame Nacional de Cursos 2000).

Professora Ana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

A luz é onda e partícula. Não sei e não lembro do assunto (a relação Matemática). O interferômetro pode ser utilizado para comprovação da dualidade onda-partícula.

É importante observar que a professora Ana não compareceu em três encontros, sendo assim, os 25% que poderia ter infreqüência para receber o certificado. Muitas das atividades propostas não foram realizadas como, por exemplo, o primeiro mapa conceitual. Portanto esboçaremos apenas o mapa conceitual confeccionado por ela no último encontro, ficando inviável uma comparação. Faremos apenas alguns relatos sobre o mesmo.

Professora Marta:

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

(i) Dualidade onda-partícula na minha versão explicaria usando o IMZ, mostrando que o fóton ora se comporta como partícula e ora como onda.

Professora Paula

Primeira resposta:

Não sei mais nada sobre esse assunto.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

Professora Joana

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

A luz tem um comportamento ondulatório no caminho que ela irá percorrer, sendo que seu início é uma partícula na saída e na chegada.

O interferômetro de Mach-Zehnder.

Professor Pedro

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

- O experimento capaz de servir como comprovação da dualidade onda-partícula é IMZ.

- A equação de M. Planck – $E=h.f$. quantificou a energia – retirou-se a descontinuidade da energia.

- Somente foi possível admitir coerência a partir do fim da idéia de que a luz seria uma função contínua. Início da quantificação da energia, “quantas”.

Professor Paulo

Primeira resposta:

Não respondeu esta questão.

Segunda resposta:

Não respondeu esta questão.

5.3 Mapas conceituais construídos no primeiro e último encontro

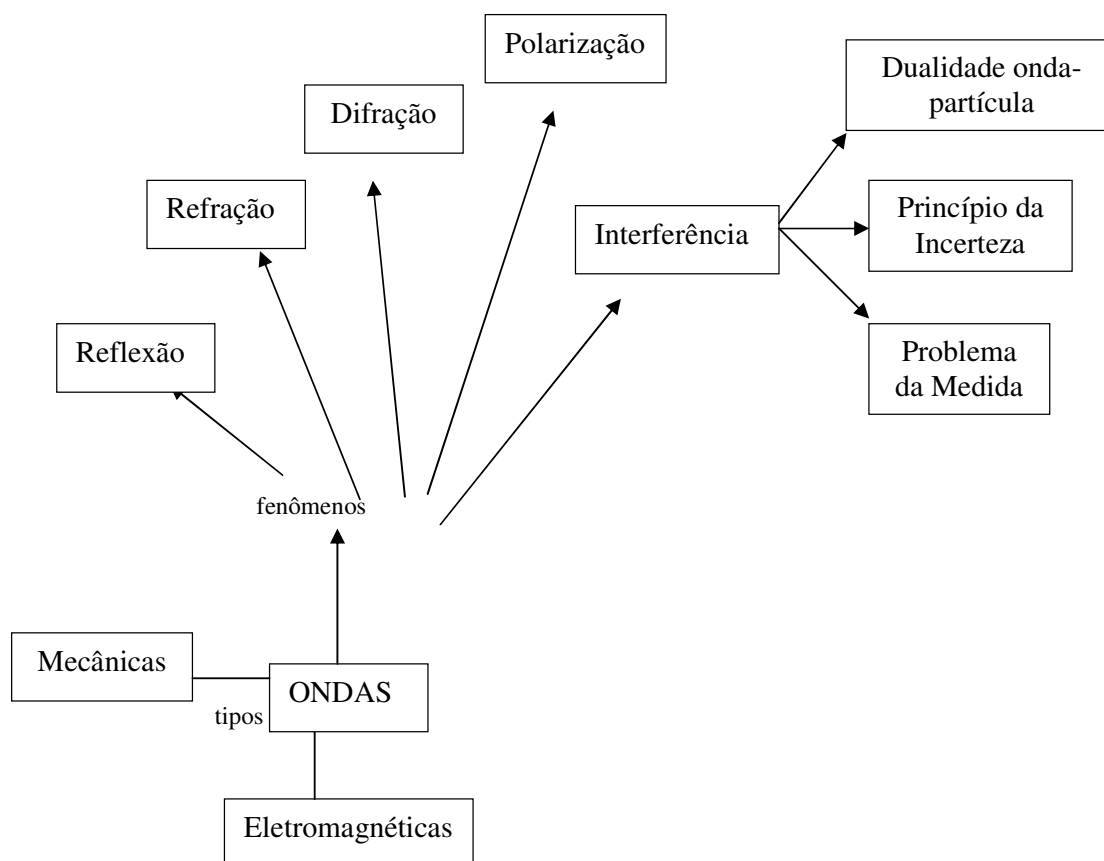
Através dos mapas conceituais construídos no primeiro encontro, pudemos visualizar que na maioria dos mapas faltam palavras-chave que interliguem os conceitos. Além disso, percebemos que dois apresentavam a interferência como um dos seus fenômenos e que eram restritos, ou seja, apresentavam poucos conceitos apesar do tema proporcionar várias abrangências, como por exemplo: meio de propagação, grandezas e natureza.

Também observamos que os primeiros mapas, em sua maioria, não apresentavam ordem de conceitos, o conceito do qual se tratava o mapa nem sempre foi destacado com uma figura geométrica diferente das quais estavam os outros conceitos. Foram usadas muitas setas, o que pode vir a transformar um mapa conceitual em um diagrama de fluxo. Todas estas

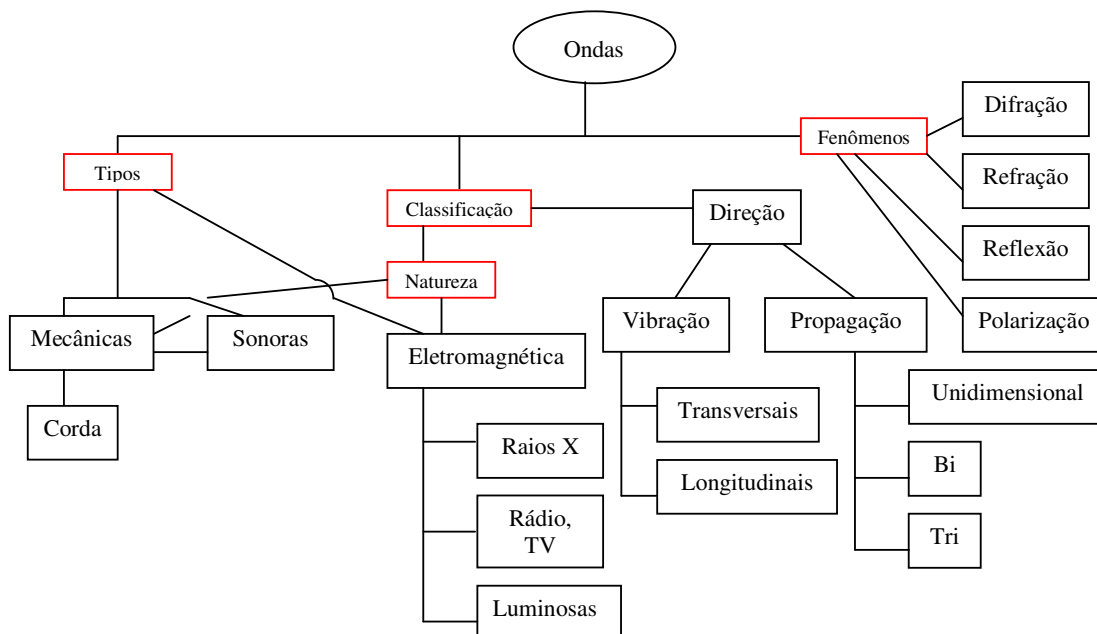
observações foram colocadas após as apresentações dos trabalhos, ajudando assim na construção de seus próximos mapas conceituais.

Já os mapas construídos no último encontro continham mais conceitos, incluindo conceitos relacionados a FMC que antes não foram citados, e estes estavam interligados por um número maior de palavras-chave.

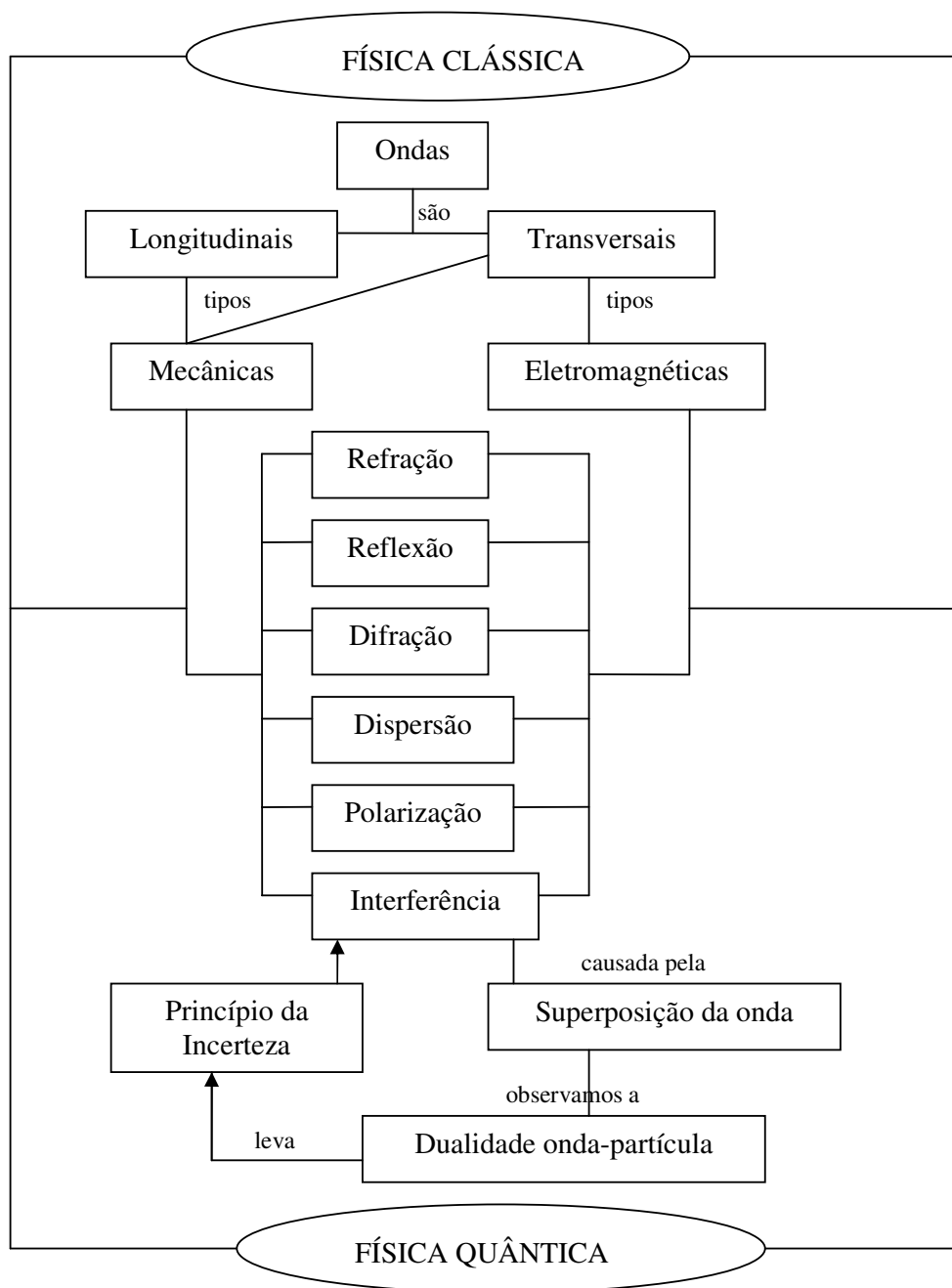
5.3.1 Mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pela Professora Ana na metade do curso para professores de escolas estaduais



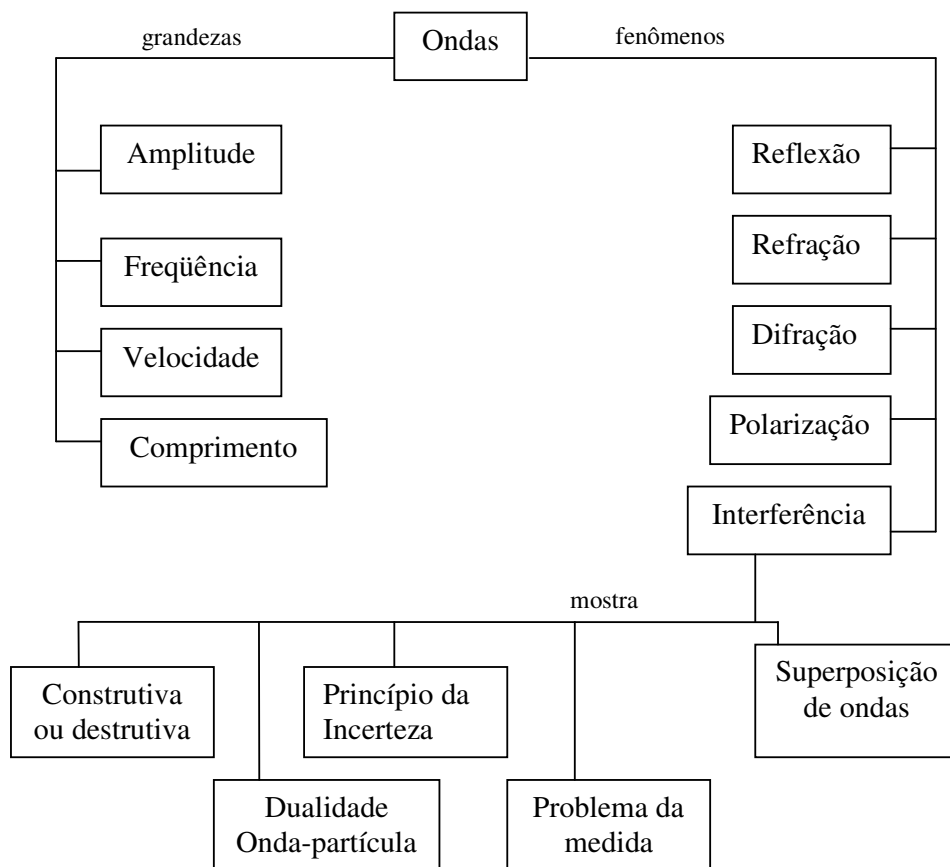
5.3.2 Primeiro mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pelos Professores Marta e Joana durante o curso para professores de escolas estaduais



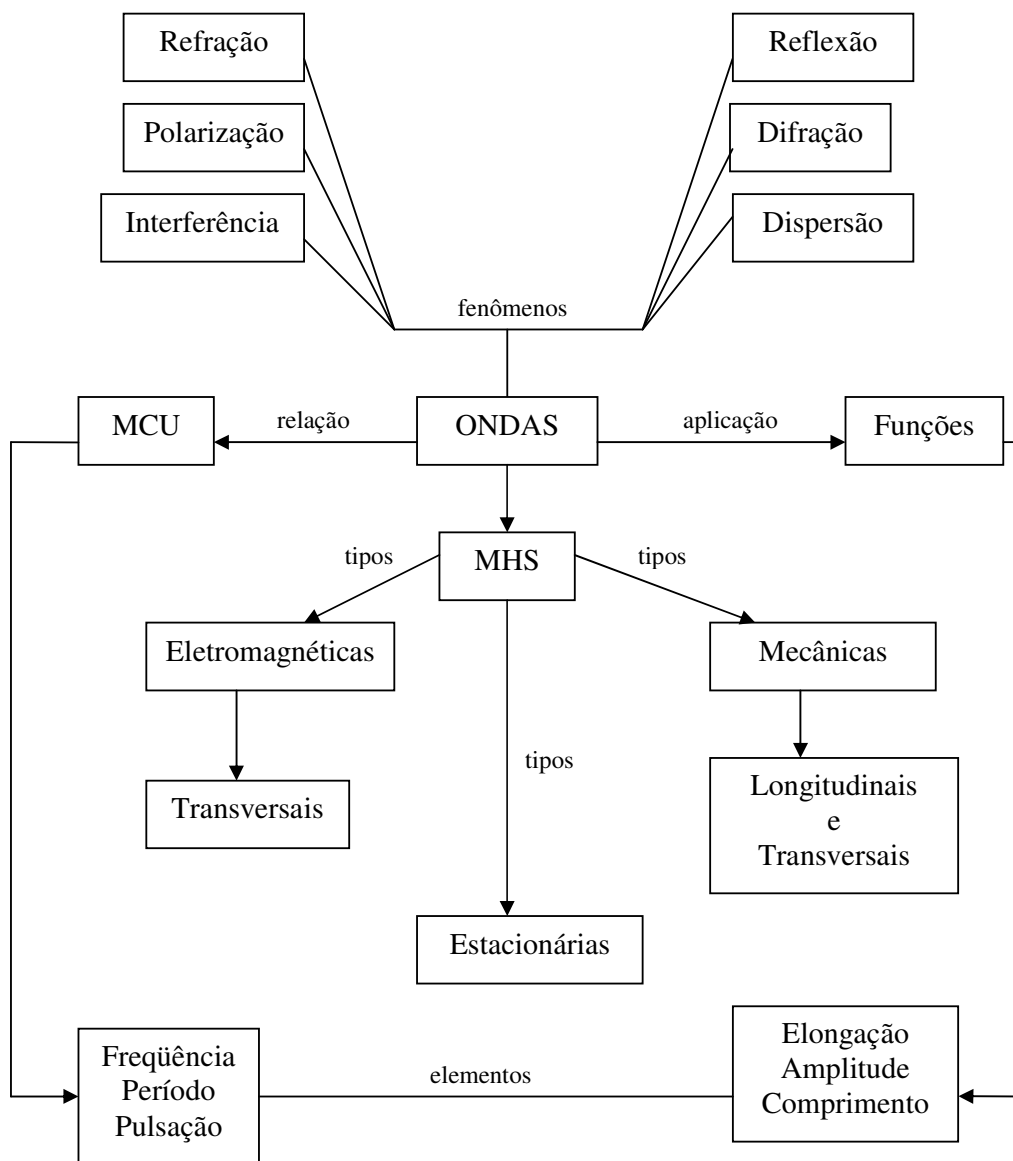
5.3.3 Segundo mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pela Professora Marta durante o curso para professores de escolas estaduais



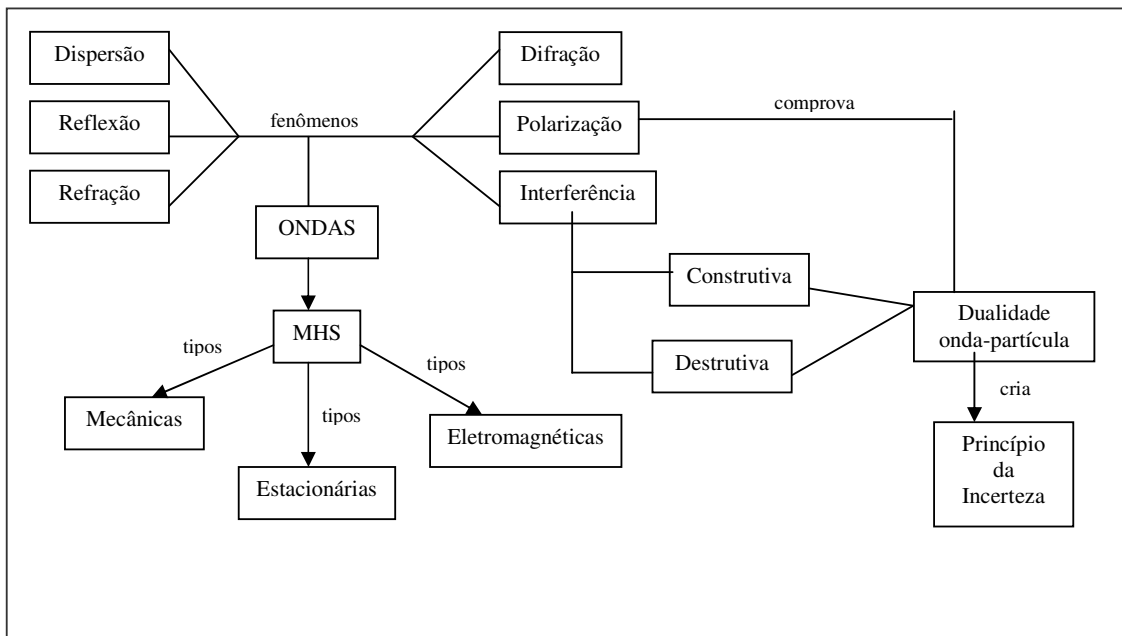
5.3.4 Segundo mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pela Professora Joana durante o curso para professores de escolas estaduais



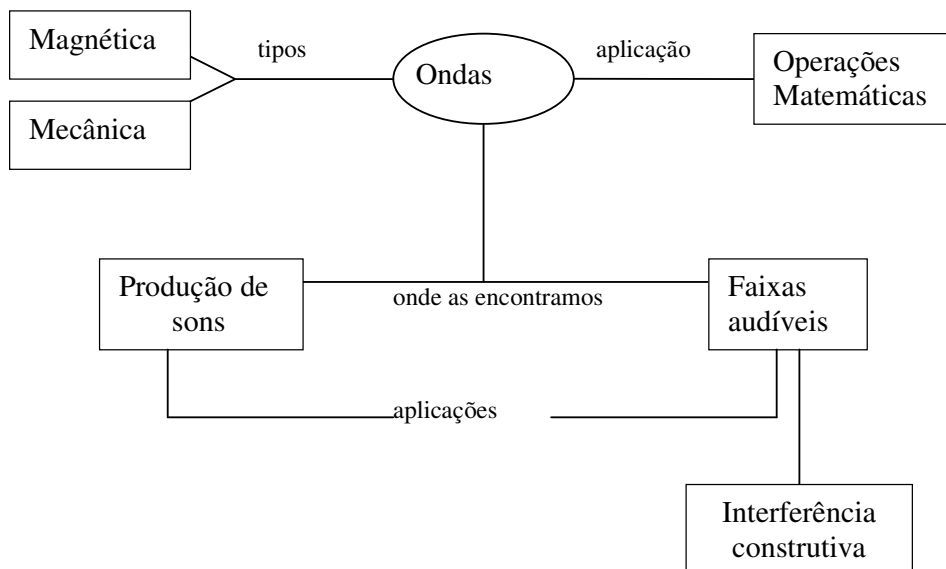
5.3.5 Primeiro mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pelos Professores Paula e Pedro durante o curso para professores de escolas estaduais



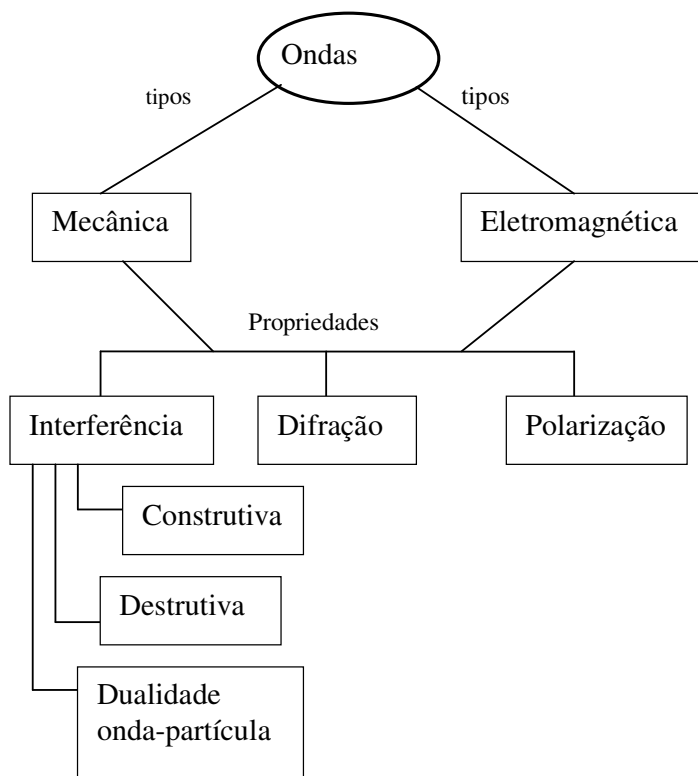
5.3.6 Segundo mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pela Professora Paula durante o curso para professores de escolas estaduais



5.3.7 Primeiro mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pelo Professor Paulo durante o curso para professores de escolas estaduais



5.3.8 Segundo mapa conceitual sobre fenômenos ondulatórios elaborado pelo Professor Paulo durante o curso para professores de escolas estaduais



6 COMENTÁRIOS FINAIS

No presente trabalho relatamos a experiência que tivemos com a aplicação do projeto proposto para um grupo de seis professores da rede pública estadual. Esses professores se propuseram voluntariamente a fazer um curso de extensão que tinha como principal objetivo a discussão de tópicos conceituais de introdução à física quântica. Foi possível observar uma correlação entre interesse pelo assunto e dedicação com o aproveitamento. Todos os participantes com frequência mínima de 75% obtiveram um certificado do curso emitido pela Pró-reitoria de Extensão da UFRGS. O certificado foi importante para garantir presença, mas não o suficiente para uma total imersão de todos no assunto discutido no curso.

Entre os participantes, em especial em dois deles (Marta e Pedro), percebia-se nitidamente o interesse em aprender, em relacionar os seus conhecimentos prévios com os conteúdos trazidos pelos textos e guias experimentais, para poder assim levar algo de “novo” para a sala de aula. O participante que estava inicialmente em maior distanciamento com o assunto, explicou no seu questionário que apenas teve uma disciplina de Física em toda sua graduação, mas que lecionava Física para os três anos do Ensino Médio de sua escola há três anos. Em um de seus comentários durante o curso, colocou que trabalhava bastante com o livro *Bonjorno* e com cálculos e que a teoria ficava “mais de lado”.

Os professores gostaram da novidade de se trabalhar com um *software* educacional e, em especial, com o *software* do IMZ. Eles ressaltaram que foi importante o fato de termos trabalhado antes com o texto de apoio: “Difração, Polarização e Interferência: Fenômenos Ondulatórios da Luz” (Apêndice A), para somente depois utilizarmos o *software*. Na opinião dos participantes, o aluno poderia visualizar o fenômeno da dualidade onda-partícula através do *software* e com a ajuda do professor, contextualizar com temas de ondulatória clássica, previamente trabalhados. Essa contextualização, no entanto, não é óbvia ou direta, visto que os participantes manifestaram que não sabiam ou imaginavam quais conteúdos da Física Clássica poderiam vir a servir de fundamento ou porta para se introduzir a Física Moderna no Ensino Médio. No geral, o uso do IMZ virtual aliado aos textos de apoio foi bem recebido

pelos participantes, quando eles perceberam que a abordagem da Física Moderna no Ensino Médio não é uma barreira intransponível. A falta de confiança que muitos dos professores de Ensino Médio (com pouca ou nenhuma formação de física quântica) pode se manifestar no sentido do professor evitar ou nunca se referir ao tema em sala de aula. A possibilidade de uma discussão mais conceitual aliada a um *software* em que o aluno possa fazer alguma **imagem** de uma situação deveras abstrata, motivou os participantes a, pelo menos, se interessarem pela idéia de uma investida no tema em sala de aula.

Cabe aqui algum comentário dessa imagem que o aluno de Ensino Médio eventualmente poderá fazer do fenômeno da dualidade onda-partícula ou mesmo das entidades quânticas propriamente. É natural que atrás desse termo **imagem** estão embutidas questões epistemológicas e ontológicas como as próprias interpretações da mecânica quântica. Aqui também poderia-se falar sobre o próprio questionamento de qual o melhor método de se introduzir a Física quântica para o Ensino Médio. A literatura especializada mostra pontos de vistas divergentes. Entre as principais dissidências, podemos citar autores que defendem o uso da Física Clássica, mais particularmente, a mecânica ondulatória como ponto de partida para a introdução de Física Moderna e autores que defendem um total rompimento com a mecânica clássica, visto que os fenômenos particularmente quânticos não têm análogo no mundo newtoniano. Nesse trabalho, alinhamos com o primeiro grupo, visto que nos baseamos na óptica física para dar início as discussões de física quântica. Mais do que uma preocupação com esse nível de discussão, focamos nosso projeto na questão da utilização do *software* educacional para introduzir os conceitos de dualidade onda-partícula e também seu uso como ferramenta motivadora.

O *software* foi amplamente aprovado pelo grupo e colocado como um viável instrumento de ensino para o nível do Ensino Médio, não sem algumas críticas e sugestões. Os professores comentaram, por exemplo, que se podia ter uma tecla de *pause*, onde as informações na legenda não fossem apagadas, dando seqüência ao experimento assim que novamente clicássemos no botão *pause*.

O número de professores participantes do curso foi relativamente pequeno que justifica uma análise qualitativa e não quantitativa do material. O questionário (pré e pós-teste) aplicado durante o curso pudemos constatar nas primeiras questões que dizem respeito a

física quântica e Física Moderna os professores responderam que estudaram alguns conceitos no Ensino Superior porém lembram vagamente esses conceitos, livros e disciplinas que tratam estes assuntos, alguns citaram a teoria do éter e a teoria da relatividade. Os professores ainda comentaram que não fazem muitas leituras sobre Física Moderna e que seus alunos pouco os questionam sobre tais assuntos.

As questões 4, 7 e 8 (Anexo B) que podemos julgar como definitivas na análise de nosso material utilizado no curso, ou seja, na questão 4 onde pede que o professor aponte um “experimento” (real ou imaginário) significativo da física quântica, qual indicaria?, obtivemos as seguintes respostas: no pré-teste nenhum professor soube apontar um experimento e no pós-teste quatro dos seis professores apontaram o interferômetro virtual de Mach-Zehnder mostrando que aceitaram o interferômetro como proposta significativa no ensino de física quântica.

As questões 7 e 8 citadas agora citadas, Q7. A figura é uma vista superior do aparato usado pelo médico Thomas Young - em 1801 - para realizar seu famoso *experimento da fenda dupla* com a luz. S_0 é uma pequena fenda simples em um anteparo, e S_1 e S_2 constituem uma fenda dupla, sobre um segundo anteparo, situado entre o primeiro e a tela. (i) O que foi observado por ele na tela que comprovava fortemente a teoria *ondulatória* da luz? (ii) Qual a finalidade do anteparo com a dupla fenda? (iii) Qual a finalidade do anteparo com apenas uma fenda? (iv) Que fenômenos ondulatórios “estão por trás” do resultado observado na tela?

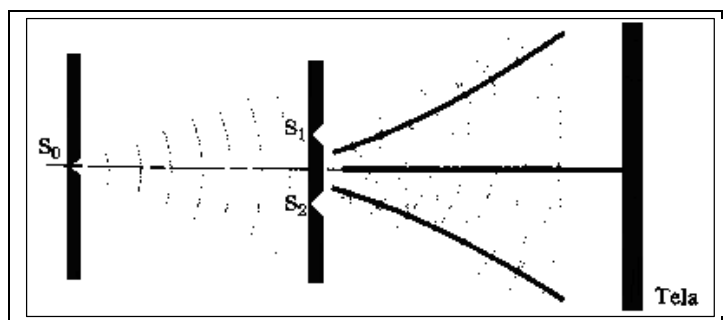


Figura 1- Experimento da Dupla Fenda

e Q8. A partir do experimento de Young e de outros que se seguiram na primeira metade do século XIX, a idéia de que a luz é algum tipo de onda foi se firmando. Durante a segunda metade desse século, acreditou-se cada vez mais e foi comprovado, sistematicamente, a partir

do trabalho experimental de Hertz (1887), que a luz pode ser considerada uma *onda eletromagnética*. No entanto, a partir do trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico (1905), começou a vingar uma renovada *teoria corpuscular*, que considerava agora a luz como sendo formada por “corpúsculos”, denominados, mais tarde, *fótons*. Considere novamente o experimento da fenda dupla. (i) Se ele fosse realizado com um feixe luminoso monocromático tão fraco que apenas um *único fóton* incidisse no anteparo de cada vez (*feixe monofotônico*), o que você acha que seria observado na tela após algum tempo decorrido?, mostraram que os professores ancoraram, fortaleceram seus subsunçores, pois no pré-teste os mesmos não tinha respondido estas questões e no pós-teste a maioria mostrou facilidade responde-las corretamente, por exemplo citando as franjas de interferência, a superposição de ondas, a coerência da luz e por final o padrão de interferência.

Apesar do pequeno grupo de professores participantes no curso, pudemos divulgar os trabalhos realizados pelo nosso mestrado e que os mesmo podem ser encontrados no sítio do Instituto de Física. Pudemos principalmente, estudar o uso do *software* em um contexto fora da universidade e para um grupo heterogêneo que pôde bem representar os professores de Física do Ensino Médio das escolas públicas. Foi rica a troca de idéias, de conhecimentos e de vivências escolares. O grupo se surpreendeu com a facilidade da utilização do *software* virtual IMZ e sua aplicação nos dois conceitos: clássico e moderno. Todos levaram uma cópia salva em disquete para suas escolas, pois uma das vantagens do programa é que ele é pequeno e por isso pode ser salvo em todos os microcomputadores das escolas, não dependendo de *internet* para sua utilização.

Através dos questionários e mapas conceituais observamos que alguns professores ancoraram suas novas informações em seus subsunçores, fortalecendo-os. Outros, acreditamos, criaram no curso alguns dos subsunçores. Pelo que se pode analisar nos questionários e mapas conceituais acreditamos que nossos professores saíram com mais ânimo, entusiasmo, conhecimento no assunto e na metodologia proposta no curso.

REFERÊNCIAS

BARBA, M. L. P. *Os serviços educativos e de popularização de ciência nos museus e centros de ciências e tecnologia: a visão do Explora*. Disponível em: <www.comciencia.br/reportagens/2005/12/14.shtml>. Acesso em: 5 jan. 2006.

BARROS, J. A.; CAVALCANTE, M. A.; JARDIM, V. Inserção de física moderna no ensino médio: difração de um feixe laser. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v.16, n. 2, p. 154-169, ago. 1999.

BONJORNO, R. A.; BONJORNO, J. R.; BONJORNO, V.; RAMOS, C. M. *Física completa*. São Paulo: FTD, 2001.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 19, n. 3, p. 291-313, dez. 2002.

CARRON, W.; GUIMARÃES, O. *Física moderna*, São Paulo: Editora Moderna, 2003. volume único.

CAVALCANTE, M. A. O ensino de um nova física e o exercício da cidadania. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 21, n. 4, p. 550-551, dez. 1999.

CHIARELLI, R. A. *Física moderna e contemporânea no ensino médio: é possível abordar conceitos de mecânica quântica?* 2006. vii, 171 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006. p. 1-8. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/pos/index.htm>>. Acesso em: 11 ago. 2008.

DIAS, N. L.; PINHEIRO, A. G.; BARROSO, G. C. Laboratório virtual de física nuclear. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 232-234, jun. 2002.

GASPAR, A. *Física*, São Paulo: Editora Ática, 2000. v. 1 Mecânica.

_____. *Física*, São Paulo: Editora Ática, 2000. v. 2 Ondas, óptica e termodinâmica.

_____. *Física*, São Paulo: Editora Ática, 2000. v. 3 Eletromagnetismo, física moderna.

_____. *Física*, São Paulo: Editora Ática, 2001. volume único.

GRAF. *Física*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. v. 2 Física térmica, óptica.

_____. *Física*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1993. v. 3 Eletromagnetismo.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*, Porto Alegre: Bookmann, 2002.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B.; *Curso de física*. São Paulo: Scipione, 1997. v. 1.

_____. *Curso de física*. São Paulo: Scipione, 1997. v. 2.

_____. *Curso de física*. São Paulo: Scipione, 1997. v. 3.

_____. *Física*. São Paulo: Scipione, 1997. volume único.

_____. *Física*. São Paulo: Scipione, 2008. volume único.

MENEZES, L. C. Trabalho e visão de mundo: ciência e tecnologia na formação de professores. *Revista Brasileira de Educação*, Rio de Janeiro. n. 7, p. 75-81, jan/abr. 1998.

MOREIRA, M. A. *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora UnB, 1999.

_____. *Teorias de aprendizagem*. São Paulo: EPU, 1999.

MOREIRA, M. A.; OSTERMANN, F. *Teorias construtivistas*. Porto Alegre: Instituto de Física - UFRGS, 1999. (Textos de apoio ao professor de física; n. 10).

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, jun. 2005.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Construindo uma unidade didática conceitual sobre mecânica quântica: um estudo na formação de professores de física. *Ciência & Educação*, Bauru, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

_____. Conceitos de física quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 22, n. 1, p. 9-35, abr. 2005.

PCNEM. Ministério da Educação. *Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias – PCNEM*. Brasília: Secretaria de Educação Média e Tecnológica, 2004.

PESSOA JUNIOR, O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

PIRES, M. A.; VEIT, E. A. Tecnologias de informação e comunicação para ampliar e motivar o aprendizado de física no ensino médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 28, n. 2, p. 241-248, abr./jun. 2006.

REZENDE, F. As novas tecnologias na prática pedagógica sob a perspectiva construtivista. *Ensaio: pesquisa em educação em ciências*, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 75-98, 2000.

RICCI, T. F.; OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. O tratamento clássico do interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento da fenda dupla na introdução da física quântica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-88, jan/mar. 2007.

SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H. L.; CASTRO FILHO, J. A. de; PEQUENO, M. C. Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São Paulo, v. 30, n. 3, 3501-3513p. jul./set. 2008.

SILVA, D. N. *Física*. São Paulo: Editora Ática, 2003. volume único.

SOFTWARE educacional livre do Interferômetro de Mach-Zehnder. Disponível em: <www.if.ufrgs.br/~fernanda>. Acesso em: 5 jan. 2006.

TERRAZZAN, E. A. A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez. 1992.

ZETIE, K. P. et al, How does a Mach-Zehnder interferometer works? *Physics Education*, London, v. 35 n. 1, p. 46-48, Jan. 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Texto de apoio ao professor de Física I.

Difração, Polarização e Interferência: Fenômenos Ondulatórios da Luz

1. Introdução

Somos todos fascinados pela luz, não sem razão, principalmente porque sem luz, não haveria vida na Terra. Ela não é somente um fenômeno físico dos mais belos para os nossos olhos, mas nossos olhos são órgãos apropriadamente adaptados à detecção de ondas eletromagnéticas, na região do espectro visível, ou seja, da luz. A luz é uma onda eletromagnética, assim como microondas, ondas de rádio, raios-X, que se propaga no vácuo com uma velocidade de aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s tendo uma frequência característica de alguns 10^{14} Hz e comprimentos de onda (distância entre duas cristas da onda) de décimos de micrometros. Sendo uma onda eletromagnética, a luz é uma onda transversal o que significa que a propagação da mesma se dá na direção perpendicular às oscilações dos campos elétrico e magnético que a compõem.

A luz é uma onda que transporta energia, mas pode também empurrar objetos. Einstein pôs que ela tem momentum linear, muito embora não tenha massa. Se mostra em diferentes cores, em diferentes tons e também em diferentes nuances. Newton acreditava que ela era composta por pequeníssimos corpúsculos que ao colidirem com nossa retina, depositavam energia nos nossos olhos formando a imagem do objeto visto. Na hipótese newtoniana, a luz anda em linha reta e percorre a menor distância possível entre dois pontos no espaço. Por outro lado, Thomas Young realizou experiências cujos resultados só poderiam ser entendidos com uma teoria ondulatória da luz. Nessa teoria, a mesma contorna obstáculos de forma que sombras poderiam, sob certas circunstâncias, ser banhadas por luz. Mais tarde, no final do século XIX, Maxwell mostrou que ela não somente era uma onda, mas de fato, uma onda eletromagnética, o que reforça as teorias ondulatórias da luz. Então veio Planck com os *quanta* de luz, a idéia de que é composta por pequenos pacotes de energia, o *quantum*. Por fim, para explicar o efeito fotoelétrico, em 1905, Einstein teoriza que a luz ora se

comporta como onda e ora como composta pelos corpúsculos de Planck, propondo assim, um caráter dual para sua natureza, hipótese que sobrevive até nossos dias.

As ondas eletromagnéticas, assim como todas as ondas, estão também sujeitas a todos os fenômenos ondulatórios como reflexão, refração, difração e efeito Doppler, por exemplo. A polarização por sua vez, ocorre somente nas ondas transversais e nesse particular, a luz também se difere do som. O som é uma onda mecânica, pois precisa de um meio para se propagar é longitudinal, pois há oscilações das partículas do meio no qual o som se propaga, também no sentido de sua propagação. Para exemplificar a propagação do som, vamos usar um exemplo prático de grande utilidade para a saúde pública – as barreiras acústicas.

As ondas sonoras são ondas cujos comprimentos de onda típicos no ar variam de alguns poucos centímetros a algumas dezenas de metros. Uma solução para a diminuição do barulho nos bairros ou vilas próximas a grandes rodovias é a construção de muros relativamente espessos e altos (de 3 a 5m) margeando as rodovias. Esse recurso já é usado em várias partes dos Estados Unidos e está sendo adotado também em partes da Rodovia dos Bandeirantes no Estado de São Paulo. O muro deve ser espesso e feito com materiais apropriados para absorverem parte do som que nele incide e também alto para funcionar como uma barreira de som e formar uma zona de silêncio nas vizinhanças atrás do muro. Ainda assim, por causa da difração do som, ondas de comprimentos de onda grandes (baixa frequência) acabam sendo difratadas entrando na região que se não fosse a difração, seria a região de *sombra sonora*¹.

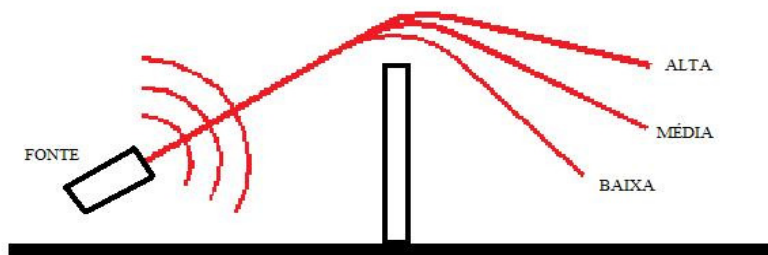


Figura 1- Variação de difração sobre barreira a diferentes frequências. Ilustração adaptada de http://www.arch-tec.com.br/Acustica_Arquitetonica_tx_compl.html (último acesso em 24/01/2010)

¹ Esses dados foram obtidos em http://www.arch-tec.com.br/Acustica_Arquitetonica_tx_compl.html (último acesso em 24/01/2010)

Os efeitos ondulatórios associados ao som são mais corriqueiros no nosso cotidiano, embora, talvez não tenhamos muita consciência disso. Os teatros e salas de concertos são projetados cuidadosamente para que possam ter um som de qualidade em todo o seu espaço. Ambientes mal-projetados podem ter sua qualidade sonora totalmente destruída em determinados pontos. Você pode já ter se deparado com a situação de procurar lugares em um salão onde a música ou o discurso lhe parecesse mais nítido em um show ou em um comício, por exemplo. Algumas regiões podem apresentar o som mais nítido e reforçado enquanto que em outras, praticamente nada é ouvido. Aqui, falamos de interferência sonora.

Assim como o som, a luz também exhibe difração e interferência, mas em situações menos corriqueiras. Por ter um comprimento de onda da ordem de um milhão de vezes menor que o do som no ar, a difração e a interferência da luz são fenômenos para os quais precisamos prestar atenção nas situações que nos rodeiam para observá-los. Se ela se propaga por aberturas das dimensões rotineiras como milímetros, centímetros e metros ou é barrada por obstáculos dessas mesmas dimensões, estaremos no domínio da óptica geométrica, um ramo da Física, para o qual se propaga em linha reta. Para as dimensões macroscópicas, não se fala em interferência e difração, pois estas são muito difíceis de serem detectadas. Por outro lado, se dividirmos as dimensões rotineiras por um fator de 100, 1000 ou 100000, então estaremos falando de aberturas e ou obstáculos de dimensões na faixa de micrometro. Nessa escala, estaremos no domínio da óptica física ou da óptica ondulatória, onde a luz contorna obstáculos e a superposição de dois feixes oriundos de uma fonte coerente como *laser* pode gerar ausência de luz ou escuridão.

Vamos comentar um pouco sobre as principais propriedades do fenômeno ondulatório mais diretamente relacionadas com a simulação dos efeitos ondulatórios no *software* do interferômetro de Mach-Zehnder virtual, inclusive a polarização que é exclusiva das ondas transversais, entre elas, das ondas eletromagnéticas.

2. Reflexão e Refração

O fenômeno de refração que ocorre nas ondas é observado quando uma onda depara-se com a interface entre dois meios de diferentes densidades como a superfície de separação

entre água e ar, água e óleo, ar e vidro, metal e ar, por exemplo. Na reflexão a onda volta para o meio de incidência (figura 2).

Junto com a reflexão temos também ocorrência de refração, ao passar de um meio para o outro, a mudança no índice de refração acarreta uma alteração da velocidade da onda em relação à velocidade no meio de origem da onda. Quando isso acontece, parte da onda é então refletida para o meio de origem e parte da onda se propaga para o segundo meio. A relação entre a velocidade v , o comprimento de onda λ e a frequência da onda f é relativamente simples, $v = \lambda f$. Na transição de um meio para outro, tanto o feixe refletido quanto o feixe refratado, aquele que segue pelo segundo meio, tem a mesma frequência da onda incidente. A frequência da onda não se altera, pois é uma característica da fonte, enquanto que para o feixe refratado, λ e v são proporcionalmente alterados. Um outro efeito sofrido pelas ondas quando passam por meios de diferentes densidades é a mudança de fase da onda refletida em relação à onda incidente. Mais especificamente, quando a onda se propaga de um meio menos denso para um meio mais denso, a onda refletida sofre uma inversão de fase em relação à onda incidente. Essa inversão não acontece, porém, quando a onda se propaga de um meio mais denso para um meio menos denso. É de se esperar que não possamos ver a inversão de fase de modo direto para a luz, mas os recursos de duas cordas de diferentes densidades unidas ou de cordas com uma das extremidades rigidamente fixa ou presa por uma argola que pode oscilar ao longo de uma haste permite a visualização da inversão de fase em ondas mecânicas.

Na figura 2 esquematizamos a frente de onda² da luz para ilustrar a reflexão de ondas em um espelho plano comum.

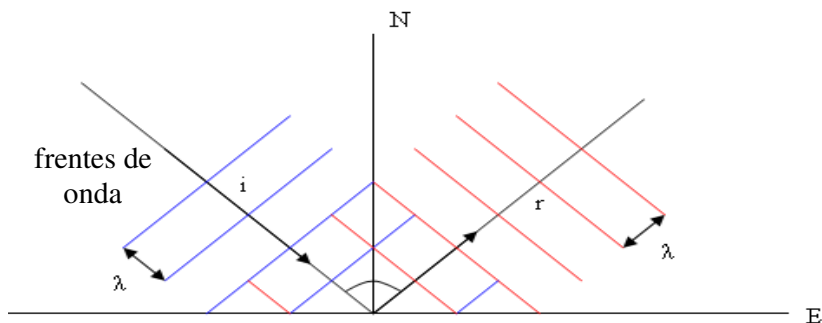


Figura 2 – Reflexão da luz em um espelho plano comum

² Uma frente de onda é o lugar geométrico de todos os pontos em que a fase de vibração harmônica de uma quantidade física é a mesma. (<http://educar.sc.usp.br/optica/luz.htm> - último acesso em 25/01/2011)

Como já comentamos, o fenômeno de refração tem por característica a travessia da interface meio 1 – meio 2 com diferentes densidades. Se o ângulo de incidência da onda é normal à superfície de separação entre os meios, então a onda refratada não sofre nenhum desvio em relação à direção da onda incidente, embora o feixe refletido possa ainda sofrer inversão de fase. Observamos apenas mudanças na sua velocidade e comprimento de onda (figura 3). Entretanto quando a onda incide com algum ângulo maior que zero e menor que 90 graus, observamos que além de variar a velocidade e o comprimento da onda, o ângulo de incidência é diferente do ângulo de refração (figura 4).

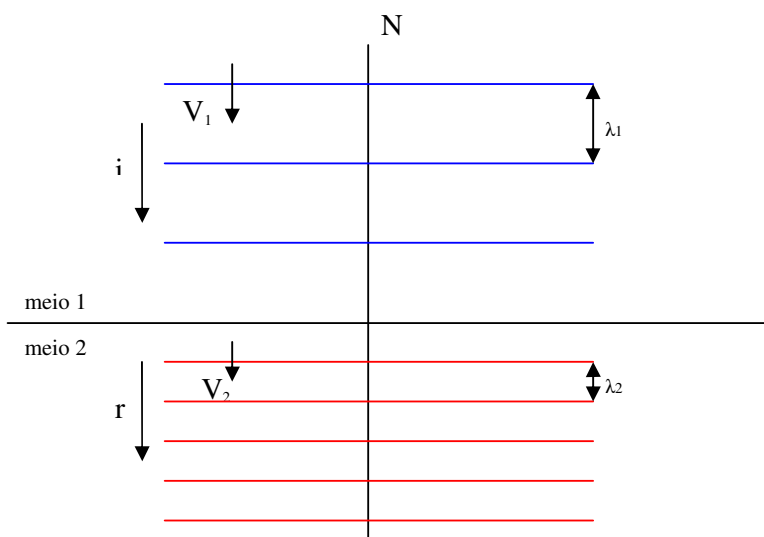


Figura 3 – Refração da luz para incidência normal à superfície de separação dos meios

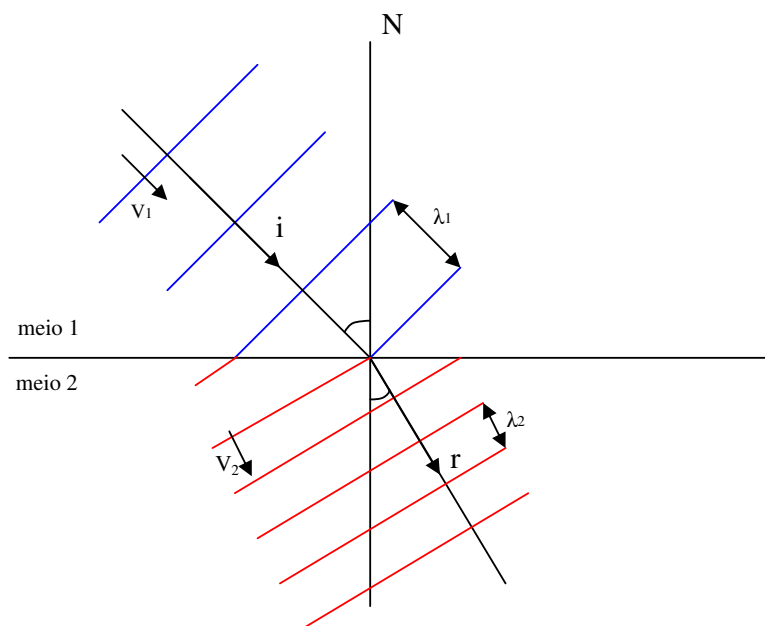


Figura 4 – Refração da luz para ângulos de incidência típicos

3. Difração

Quando uma onda mecânica ou eletromagnética encontra um obstáculo em seu caminho poderá haver difração desta onda, caso o obstáculo tenha as dimensões características da ordem de comprimento da onda em questão. Para a luz, por exemplo, temos uma melhor visualização deste fenômeno para aberturas ou obstáculos com dimensões da ordem de micrometros. A difração, no entanto, pode ser facilmente observada em um tanque com água.

Imaginemos um tanque cheio de água em repouso. Em uma das extremidades deste tanque é colocada uma régua que é movimentada para cima e para baixo periodicamente gerando ondas planas. A frequência com a qual perturbamos a superfície da água determina o comprimento de onda (distância entre as cristas) da onda gerada. Façamos ondas com comprimentos de onda de 10 cm. Agora pensemos que no meio deste tanque tem uma ripa com uma abertura relativamente estreita comparada com o comprimento da onda gerada. Façamos a abertura ter uma extensão de 1 cm. As frentes de ondas planas ao passarem pela abertura da ripa se tornam frentes de ondas circulares, ou seja, diz-se que ocorreu uma curvatura na frente de onda, isto é, ela se difratou ao passar pela abertura estreita. Este fenômeno acontece com todas as ondas contanto que as aberturas ou obstáculos tenham dimensão adequada para a onda incidente. Por isso, para abordarmos este assunto não podemos seguir os pensamentos da óptica geométrica, na qual a luz “anda” em linha reta (Halliday;1995).

4. Polarização

Ao perturbarmos uma corda com movimentos periódicos para cima e para baixo estamos gerando ondas que oscilam na direção da perturbação e que se propagam na direção perpendicular à perturbação. Podemos então efetuar as perturbações periódicas em qualquer direção de forma que as ondas geradas possam oscilar em qualquer direção também, exceto na direção de propagação, supondo que a corda seja inextensível. Assim, as oscilações podem ser ora para cima e para baixo, ora para a esquerda e para a direita, ora nas diagonais e assim por diante. Ao observamos esta situação, dizemos que a onda não está polarizada, e que

podemos polarizá-la colocando um polarizador, no qual as ondas que passam adquirem somente uma direção de oscilação determinada pelo polarizador de acordo com o eixo de polarização do mesmo.

Para a luz, não conseguimos distinguir quando a mesma é polarizada, a olho nu. Se a luz é originária de uma fonte for polarizada, a utilização de um polarizador indicará o eixo de sua polarização. Se usarmos dois polarizadores com eixos de polarização perpendiculares entre si, podemos bloquear a passagem de luz, mesmo que esta não esteja inicialmente polarizada. Esse é um excelente teste para se comprar óculos de sol polarizados. Use dois óculos idênticos e sobreponha a lente do primeiro perpendicular à lente do segundo. Se os óculos forem de boa qualidade, esse teste deve mostrar que eles diminuem bastante a intensidade da luz. No exemplo demonstrado na figura 5, o primeiro polarizador realiza uma polarização de 90° no feixe de luz que incide sobre ele, deixando-a polarizada com este ângulo.

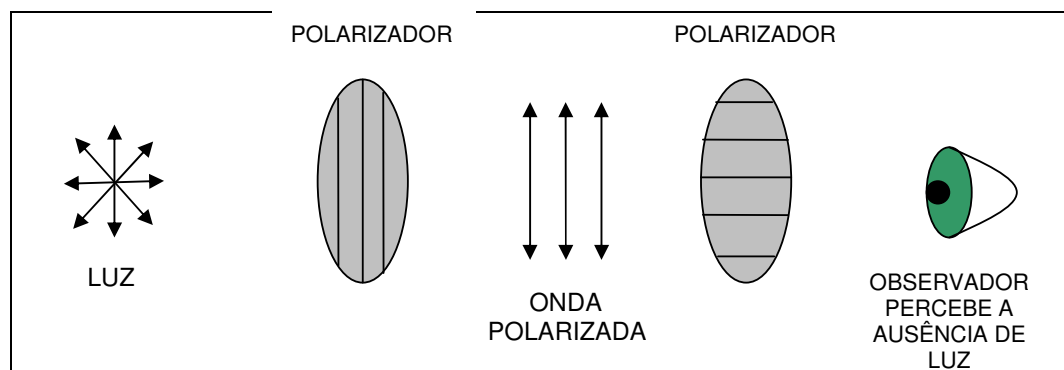


Figura 5 – Polarização da luz. As linhas verticais indicam as linhas de transmissão ou eixos de polarização dos polarizadores.

A finalização desse texto será um comentário sobre o interferômetro virtual de Mach-Zehnder (IMZ) que é um arranjo experimental pouco comentado nos livros de Física para graduação e que não aparece nos livros didáticos do Ensino Médio. O IMZ pode substituir a fenda dupla para explicar os fenômenos ondulatórios da luz, pois é mais didático. Sendo assim, é um ótimo recurso para que os professores possam trabalhar com seus alunos questões como difração, polarização e, sobretudo, interferência luminosa. O interferômetro virtual de Mach-Zehnder é um *software* educacional do tipo bancada que apresenta inúmeras

possibilidades de arranjos experimentais (virtuais) e que trabalha, inclusive, com a polarização da luz. Ao trabalharmos com *laser* incidindo em espelhos semi-refletores, ela será em parte transmitida e em parte refletida. Ao montarmos um arranjo adequado de espelhos podemos fazer essas ondas se reencontrarem de modo a se superpor gerando padrões de interferência. O uso de fontes polarizadas e polarizadores no IMZ mostram claramente os conceitos fundamentais de interferência da luz, descritos a seguir.

5. Interferência

Ao escutarmos a palavra interferência nos vem à mente a superposição de ondas, pois a interferência é resultado de superposição de duas ou mais ondas. A interferência é um fenômeno característico exclusivo das ondas, tanto das mecânicas, cuja propagação depende de um meio, quanto das eletromagnéticas que se propagam no vácuo. Os exemplos mais citados em livros didáticos são as interferências causadas pela superposição de ondas em uma corda, ondas geradas na água em um tanque, ondas sonoras e interferência com luz através do experimento de fenda dupla (Gaspar, 2001; Hewitt, 2002; Ramalho, 1999). Encontramos outros exemplos de interferência nas bolhas de sabão, manchas de óleo no asfalto, nas asas da borboleta morpho (Halliday, 1995; Tipler, 2000), casos onde a luz é refletida por películas muito finas chamadas de filmes finos, criando as condições físicas requeridas para a observação do fenômeno da interferência luminosa.

Uma aplicação tecnológica da interferência da luz, entre muitas outras, é o uso de filmes finos ou películas de monóxido de silício (Halliday, 1995) em pára-brisa de carro. A espessura das películas pode ser previamente calculada para que haja interferência destrutiva da luz para os comprimentos de onda centrais no espectro visível, diminuindo consideravelmente a reflexão desses comprimentos de onda. As interferências construtivas realçam a amplitude da onda resultante, enquanto que há um aniquilamento da amplitude na interferência destrutiva. Este recurso também é utilizado em filmes para vidros de janelas para redução do aquecimento do ambiente e em filmes para lentes de câmeras fotográficas (GREF, 2005) para redução da reflexão da luz. Citaremos exemplos de interferência em ondas mecânicas por serem mais rotineiros em nossa experiência cotidiana, mas nosso foco principal é a interferência da luz.

Neste ponto, será necessário abordarmos um conceito vital para a observação da interferência luminosa. Não é somente necessário somarmos duas ondas de luz para observarmos a interferência, mas as ondas devem satisfazer à condição de que a diferença de fase entre elas deve ser mantida constante ao longo do tempo. Se a diferença de fase entre duas ondas é constante, dizemos que os feixes são coerentes, ou que as ondas são coerentes. Luz proveniente de lâmpadas de filamentos, lâmpadas de mercúrio e fontes extensas em geral, é dita luz não-coerente. Por outro lado, o *laser* é naturalmente uma fonte de luz coerente. Podemos dividir um feixe de *laser* em dois com o uso de um espelho semi-refletor e usar espelhos de modo conveniente para colocar esses dois feixes em superposição. Como os feixes que se combinam são provenientes da mesma fonte e a fonte é coerente, então os feixes são ditos coerentes. A perda da coerência dos feixes por fatores externos destrói o padrão de interferência das ondas. A condição de ondas coerentes é uma condição geral para interferência e não somente condição para ondas luminosas. Voltaremos mais adiante a descrever melhor a questão da coerência da luz.

5.1 Interferência em uma corda

Temos ondas sendo geradas nas extremidades de uma corda, por exemplo, e estas ondas se propagam na mesma direção, com mesma amplitude e frequência, porém, em sentidos opostos como pode ser visto na figura 6. Ou seja, elas estão em fase e por isso, ao se superporem se diz que houve interferência construtiva. Caso elas possuam as mesmas características do exemplo acima, mas estejam defasadas de π rad (180°) ou $\lambda/2$, então elas se anularão gerando uma interferência destrutiva.

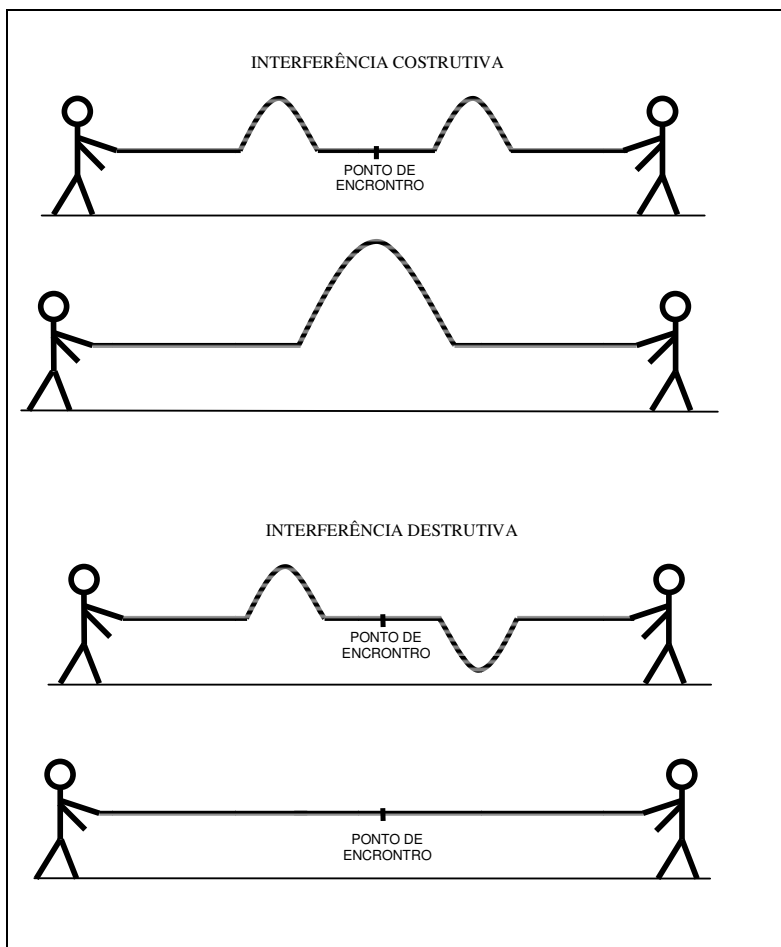


Figura 6 – Interferência construtiva e destrutiva em uma corda

5.2 Interferência em um tanque com água

A superposição de ondas em um tanque de água pode ser gerada por movimentos sincronizados de dois ou mais objetos pequenos. Se o movimento for perfeitamente sincronizado geram-se ondas coerentes que resultam em um padrão de interferência, onde podemos observar que quando duas cristas ou dois vales se encontram, eles se reforçam e temos uma interferência construtiva. Porém, quando um vale se superpõe a uma crista ocorre interferência destrutiva, sua amplitude é nula neste ponto.

5.3 Interferência sonora

O fenômeno de interferência sonora também ocorre por superposição de ondas, porém o som é apresentado por ondas longitudinais, que podem ser formadas por diferentes fontes ou por reflexão. Neste caso, as cristas de uma onda correspondem à zona de compressão e o ventre de rarefação.

Quando as ondas estão em fase, se tem uma interferência construtiva. Já quando as ondas estão defasadas de $\lambda/2$ ou π rad temos interferência destrutiva, na qual se observa a ausência parcial ou total do som, dependendo dessa diferença de fase.

Observe os esquemas gráficos mostrando o comportamento de duas ondas sonoras cuja interferência é construtiva (figura 7) e destrutiva (figura 8):

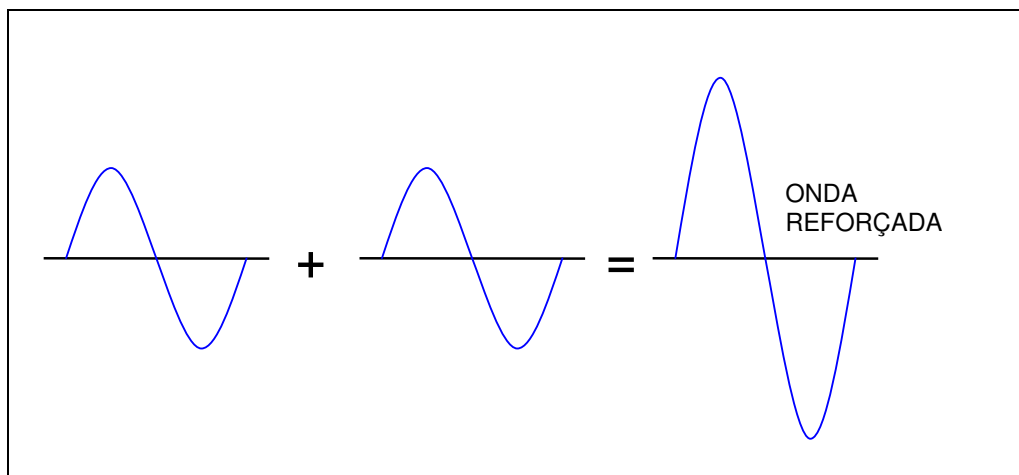


Figura 7 – Interferência Construtiva

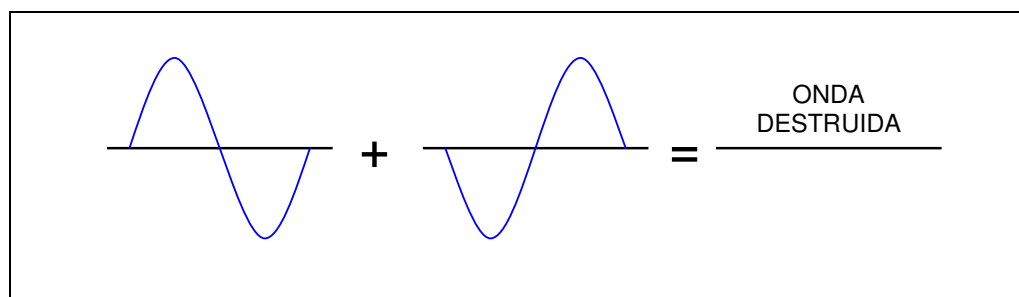


Figura 8 – Interferência Destrutiva

Há muitos exemplos de interferência sonora. Encontramos interferência sonora destrutiva quando aproximamos duas caixas de som, uma de frente à outra, na qual foram invertidas as fases de entrada. Esse tipo de interferência destrutiva é usado na tecnologia do anti-ruído. Alguns pilotos de avião e operadores de britadeiras utilizam um tipo de fone de ouvido que recebem sinais que cancelam o barulho, através das superposições das zonas de compressão e rarefação (Hewitt, 2002).

5.4 Interferência Luminosa

E a luz, o que é? Um fenômeno ondulatório ou corpuscular? Para responder essa pergunta, iniciaremos comentando fatos desde os primeiros pensamentos sobre a natureza da luz.

Começamos pelo cientista Isaac Newton (1642 a 1727) que defendia a idéia de um comportamento corpuscular para a luz, pois ela se apresentava como uma trajetória retilínea e era constituída por pequenas partículas emitidas por uma fonte. Esse modelo explicava vários fenômenos da óptica, porém não explicava porque a luz tinha sua velocidade maior na água do que no ar. Newton não conseguiu comprovar experimentalmente este fato, mas como seu prestígio era suficiente para a maior parte da comunidade científica, poucos ousaram criticar ou questionar suas idéias.

Porém esses poucos existiram, um deles foi Christian Huygens (1629 a 1695) que questionou uma teoria ondulatória para a luz. Ele acreditava que a luz se propaga através de ondas como o som, mas como ela necessitava de um meio, imaginou a existência de um, dando o nome de éter. Na teoria ondulatória a velocidade da luz na água deveria ser menor que no ar.

Já o século XIX foi de valiosas descobertas para a teoria ondulatória da luz. Em 1801, o cientista e médico Thomas Young (1773 a 1829) ficou famoso por comprovar experimentalmente que a luz tinha um comportamento ondulatório, através do experimento da dupla fenda. E anos depois o cientista Leon Foucault (1819 a 1868) comprovou que a sua

velocidade no ar era maior que na água, dando maior credibilidade, pelo menos provisoriamente, à teoria ondulatória da luz.

5.4.1 A que veio contribuir para a Física o experimento da dupla fenda

Com o experimento da dupla fenda pode-se argumentar em favor da teoria ondulatória da luz e também descobriu-se, através de cálculos, os valores de importantes grandezas físicas, como o comprimento de onda da luz.

5.4.2 Experimento da dupla fenda de Thomas Young

O experimento foi considerado relativamente simples, porém muito eficaz. Seja uma fonte de luz monocromática, duas telas opacas A e B, sendo que no centro da tela A existe um pequeno orifício S_0 (de raio da ordem do comprimento de onda da luz incidente) e na tela B há dois pequenos orifícios retangulares S_1 e S_2 com a dimensão em uma direção muito maior que a dimensão na direção perpendicular. S_1 e S_2 são equidistantes de S_0 e temos também um anteparo.

Young imaginou que se a luz apresenta um comportamento corpuscular, cuja propagação é retilínea, essa somente passaria pelo orifício da parede A, e com isso nada se veria no anteparo (Gaspar, 2001; Halliday, 1995). No entanto não foi isso que aconteceu. A luz ao passar pelo orifício da tela A difratou-se, chegando como ondas esféricas na tela B, passando pelos orifícios S_1 e S_2 e propagando-se até o anteparo. No qual se observa um padrão de superposição das ondas provenientes de S_1 e S_2 . O padrão de interferência pode ser descrito sucintamente como uma alternância de regiões iluminadas e regiões escuras comumente chamadas de franjas claras e franjas escuras. Não se pode explicar a alternância de claro e escuro com uma teoria corpuscular da luz, de forma que este experimento evidencia ou privilegia uma teoria ondulatória da luz.

Para realizar este experimento, Thomas Young teve que usar da tela A, pois a luz que ele usou não era coerente. Não temos certeza se foi luz de uma vela ou mesmo a luz do Sol, mas o fato é que não havia *laser* na época de Young e a tela A é necessária para que se

consiga um grau mínimo de coerência para os feixes que passam pelos dois orifícios na tela B. Hoje, porém, com a utilização do *laser*, a tela A não tem função, podendo ser descartada.

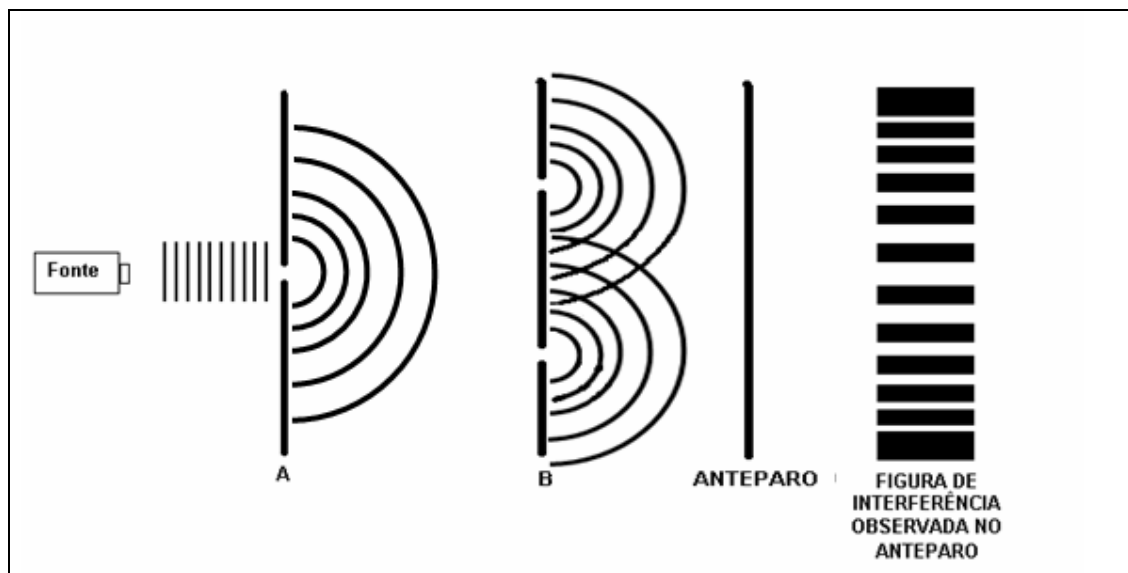


Figura 9- Experimento de Thomas Young

Tanto a luz do Sol, como de uma vela ou de uma lâmpada de tungstênio (referidas como luz branca) são compostas por ondas de vários comprimentos de onda e que não mantêm nenhuma razão constante entre suas fases ao longo do tempo ou à medida que se propagam no espaço. Essas fontes são, tipicamente, não coerentes. Mostramos na figura 10 ondas ao longo do tempo e em uma posição fixa do espaço para: (a) as ondas de uma luz branca, com diferentes comprimentos de onda, ou diferentes frequências e defasadas entre si; (b) as ondas de uma fonte de luz monocromática com ondas com diferentes defasagens (observe que as cristas não coincidem), (c) as ondas de uma fonte monocromática geradas todas em fase. A ilustração em (c) representa bem uma fonte coerente como o *laser*. É importante salientar que quando uma onda está defasada em relação a outra por qualquer fase, isso não quer dizer que o seu comprimento de onda é diferente, ou que mudou.

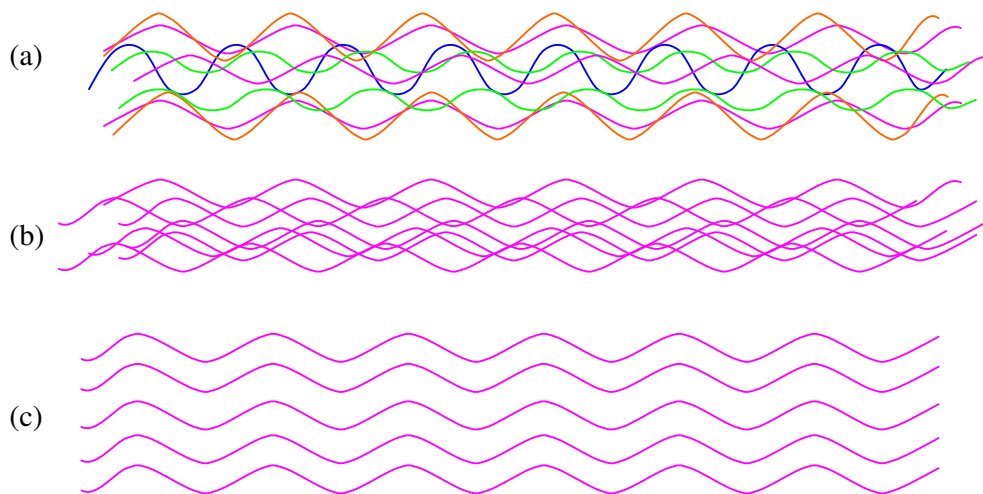


Figura 10 – Ilustração de luz coerente e não-coerente–feixe de luz não-coerente; (a) ondas emitidas por uma fonte de luz branca não coerente, (b) ondas emitidas por uma fonte monocromática coerente e (c) ondas emitidas por um *laser*.

5.4.3 Cálculo do comprimento da onda de luz

Analisando o experimento de dupla fenda podemos, através de cálculos trigonométricos, estimar o comprimento da onda da luz. Porém para facilitar o desenvolver matemático, a distância entre a tela B e o anteparo deve ser relativamente grande, tanto que a aproximação $D \gg d$ seja válida, sendo D a distância entre a tela B e o anteparo e d a distância entre as fendas na tela B conforme o esquema na figura 11. Nessa aproximação pode-se assumir que as retas x_1 e x_2 são próximas à fenda dupla, localmente paralelas e que o ângulo θ é muito pequeno. As retas x_1 e x_2 representam as direções de propagação das ondas provenientes da fenda superior e da fenda inferior respectivamente. Quando ângulo θ é próximo de zero, matematicamente, temos em radianos $\text{sen } \theta \approx \tan \theta \approx \theta$.

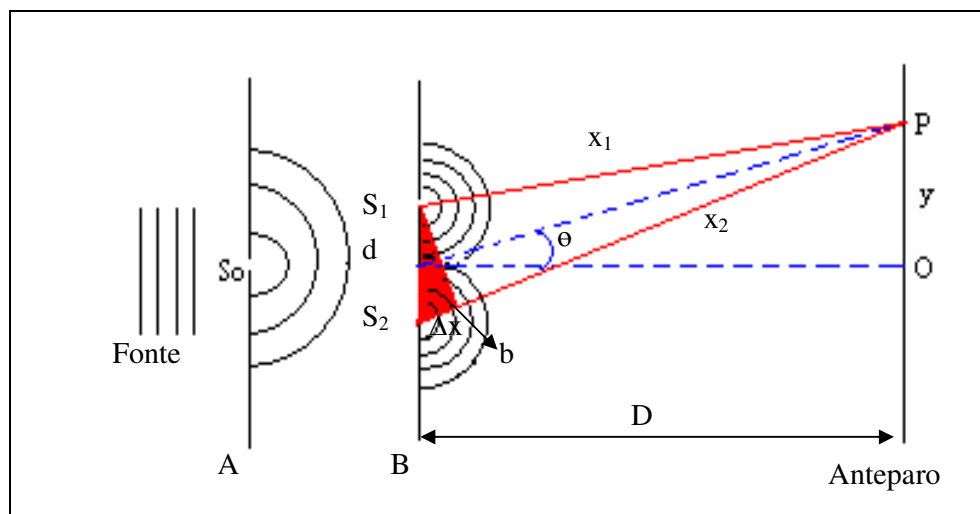


Figura 11 – Análise trigonométrica do experimento (não em escala)

Se selecionarmos um ponto P no anteparo, próximo ao centro de anteparo, teremos a figura do triângulo maior, destacado em azul, de forma que:

$$\tan \theta = \frac{y}{D} \quad (01)$$

Seguindo esse raciocínio analisamos o triângulo menor, destacado em vermelho. Deduzimos que:

$$\text{sen} \theta = \frac{\Delta x}{d} \quad (02)$$

Como $\text{sen} \theta = \tan \theta$

$$\frac{y}{D} = \frac{\Delta x}{d}$$

$$\Delta x = \frac{yd}{D} \quad (03)$$

Numa situação real usando um *laser* de He-Ne usado como apontador em seminários e aulas, poderíamos ter fendas de alguns décimos de micrometro separadas por alguns micrometros na tela B e o anteparo a uma distância de um metro da tela B. Com um arranjo nessas condições podemos responder com uma matemática relativamente simples, se um ponto arbitrário P no anteparo está em uma franja clara ou escura. Para isso, basta calcular a

diferença de percurso ou de caminho óptico entre os feixes x_1 e x_2 que corresponde a defasagem entre as ondas que passaram pelas fendas e que chegam em P. Não é difícil mostrar que se a diferença de percurso entre os feixes x_1 e x_2 for de 2π radianos ou equivalentemente, de um número inteiro de comprimentos de onda, então temos interferência construtiva. Por outro lado, se os feixes estiverem defasados de π rad ou equivalentemente de meio comprimento de onda, teremos uma região de interferência destrutiva. O centro do anteparo é sempre iluminado e tem, portanto, uma franja brilhante denotada por $m = 0$. As faixas escuras que estão próximas do centro, uma acima e a outra abaixo, simetricamente distribuídas em relação à franja central, também são denotadas por $m = 0$, mas correspondem a mínimos de interferência. As próximas franjas claras ou escuras são denotadas por $m = 1$, $m = 2$, e assim sucessivamente.

Em resumo, quando a diferença de percurso das duas ondas (Δx) for igual a zero ou a um número inteiro de comprimento de onda, teremos uma interferência construtiva, ou seja, faixas claras, brilhantes.

$$\Delta x = m\lambda \quad (04)$$

para $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Ao igualarmos as equações (04) e (03), temos o valor do comprimento de onda luminosa para a interferência construtiva, podendo assim classificar inclusive a cor desta fonte.

$$m\lambda = \frac{yd}{D}$$

$$\lambda = \frac{yd}{mD} \quad (05)$$

No entanto, quando a diferença de percurso entre as duas ondas for igual a um número semi-inteiro de comprimentos de onda teremos interferência destrutiva, ou seja, faixas escuras.

$$\Delta x = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (06)$$

para $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Igualando as equações (06) e (03) obteremos o valor do comprimento de onda luminosa para uma interferência destrutiva.

$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = \frac{yd}{D}$$

$$\lambda = \frac{2yd}{D(2m+1)} \quad (07)$$

5.4.4 Intensidade das franjas de interferência

Anteriormente vimos equações nas quais podemos localizar através do ângulo θ os máximos e mínimos de interferência. Com este mesmo experimento, podemos obter a equação da intensidade luminosa destas franjas em função de θ .

Imaginemos que componentes de um campo elétrico estejam integradas às ondas luminosas que chegam a um ponto P, sendo elas (para o *laser*):

$$E_1 = E_0 \text{sen}(kx - wt)$$

$$E_2 = E_0 \text{sen}(kx - wt + \phi),$$

sendo $w = 2\pi/T$ a frequência angular das ondas e T seus períodos, $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda e ϕ é a diferença de fase que neste caso é mantida constante, pois as ondas são coerentes. E_0 é a amplitude do campo elétrico da onda que é igual para as duas ondas, pois vamos supor que as fendas sejam de mesmo tamanho. Com base nesses dados podemos calcular o campo elétrico resultante no ponto P usando algumas relações trigonométricas bastante conhecidas (Halliday, 1995; Tipler, 2000). Seja então:

$$E_p = E_1 + E_2$$

$$E_p = E_0 \text{sen}(kx - wt) + E_0 \text{sen}(kx - wt + \phi)$$

$$E_p = E_0 [\text{sen}(kx - wt) + \text{sen}(kx - wt + \phi)] \quad (08)$$

Lembrando que:

$$\text{sen}(a + b) = \text{sen}(a)\cos(b) + \text{sen}(b)\cos(a)$$

$$\text{sen}(a - b) = \text{sen}(a)\cos(b) - \text{sen}(b)\cos(a)$$

$$\text{sen}(a + b) + \text{sen}(a - b) = 2\text{sen}(a)\cos(b)$$

Sendo assim, podemos definir que:

$$a + b = kx - wt + \phi \quad (09)$$

$$a - b = kx - wt \quad (10)$$

Efetuando um sistema destas equações teremos:

$$2a = 2kx - 2wt + \phi$$

$$a = kx - wt + \frac{\phi}{2}$$

Substituindo para achar o valor de b:

$$a + b = kx - wt + \phi$$

$$kx - wt + \frac{\phi}{2} + b = kx - wt + \phi$$

$$b = kx - kx - wt + wt + \phi - \frac{\phi}{2}$$

$$b = \frac{\phi}{2}$$

Substituindo na equação (08) a (09) e a (10):

$$E_p = E_0 [\text{sen}(kx - wt) + \text{sen}(kx - wt + \phi)]$$

$$E_p = E_0 [\text{sen}(a - b) + \text{sen}(a + b)]$$

$$E_p = E_0 [2\text{sen}(a) \cos(b)]$$

$$E_p = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{sen}\left(kx - wt + \frac{\phi}{2}\right)$$


 Amplitude da
 onda
 resultante

Como a intensidade da onda luminosa é proporcional à amplitude da onda ao quadrado (Halliday, 1995), temos especificamente para o campo elétrico que $I_0 = (E_0)^2 / (2 \mu_0 c)$ sendo E_0 a amplitude da onda, μ_0 uma constante (a permeabilidade magnética no vácuo) e c a velocidade da luz no vácuo. Ou seja, obtemos a intensidade da onda resultante no ponto P do anteparo I_p em função da intensidade da onda que passa por uma das fendas I_0

$$I_p = 4 I_0 \cos^2(\phi / 2).$$

Esse resultado mostra que a intensidade pode ser nula quando o cosseno for zero e atingir o valor máximo de $4I_0$ quando o cosseno for +1 ou -1. Além disso, o cosseno é uma

função periódica de forma que há então alternância de máximos (franjas claras) e mínimos (franjas escuras).

5.5 Abertura Circular

O padrão de interferência luminosa que aparece no anteparo esquematizado na figura 9 pode variar, isto é, dependendo do valor da abertura das fendas por onde passa a luz, da distância entre as fendas e mais genericamente, da própria geometria da fenda. No experimento de dupla fenda, ela é retangular com uma altura pequena e largura grande comparada à altura. Em decorrência dessa geometria aparece um tipo de franja retangular com uma altura grande e largura pequena. Caso o orifício seja circular, aparecerá um disco luminoso no meio do anteparo circundado por anéis escuros e luminosos alternados. Notamos também um enfraquecimento na intensidade do brilho dos anéis claros à medida que se afastam do centro do anteparo. Quando o experimento tem em sua tela apenas um orifício obtém-se um padrão de difração luminosa e quando a tela possui dois ou mais orifícios, o padrão observado é de interferência e difração da luz. De fato, Augustin Jean Fresnel (1788 a 1827) ao relacionar a experiência de Young e o Princípio de Huygens concluiu que a difração da luz é resultado de uma interferência (Barthem, 2005; Bassalo, 1988; Nussenzveig, 1998).

Segundo relato em vários textos (Barthem, 2005; Bassalo, 1988; Nussenzveig, 1998), no ano de 1818, promoveu-se um concurso de dissertações sobre difração que teve como vencedor Augustin Jean Fresnel, engenheiro militar que dissertou a respeito da teoria ondulatória da luz. Porém, Fresnel foi desafiado a comprovar experimentalmente sua teoria, pois de acordo com alguns dos jurados do concurso, o matemático e seguidor da teoria newtoniana Simèon Denis Poisson (1781 a 1840), afirmou, através de cálculos, que para a teoria de Fresnel estar correta no centro do anteparo, ao invés de termos uma mancha totalmente escura teríamos uma mancha escura com um ponto brilhante no centro. Para a surpresa de muitos, e com a ajuda de seu amigo físico Dominique François Arago (1786 a 1853), que também era juiz deste mesmo concurso, Fresnel conseguiu mostrar experimentalmente sua teoria, que deduzia que ao iluminar um disco opaco veríamos no anteparo uma figura de difração com anéis escuros e brilhantes. Porém, no centro desta figura teríamos um ponto brilhante conhecido, por muitos anos, como ponto brilhante de Poisson e mais tarde teve o nome de Fresnel.

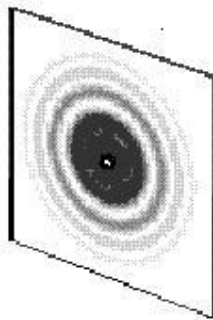


Figura 12 – Ponto brilhante de Fresnel

Ao montarmos um experimento com abertura circular, o processo é semelhante ao de fenda dupla. O que muda é a geometria do orifício e conseqüentemente, a geometria do padrão de difração ou interferência. Caso tenhamos apenas um orifício circular, a figura que aparecerá no anteparo será semelhante à figura de difração de Fresnel, e apenas contrária para seus anéis luminosos.

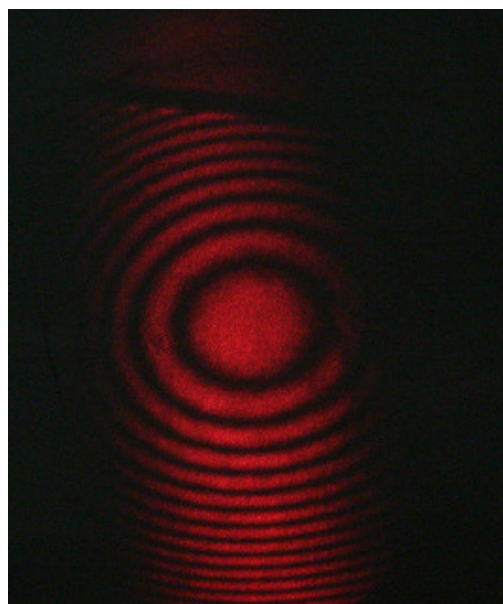
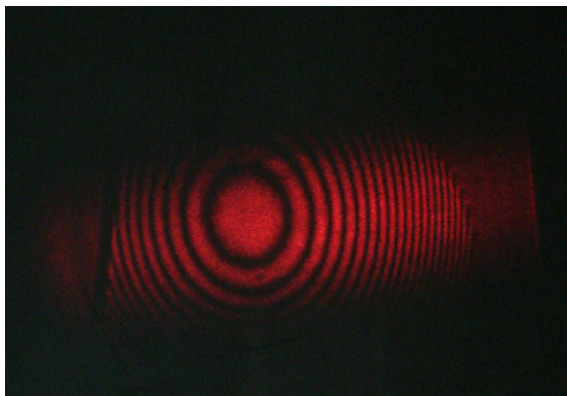


Figura 13 – Fotos feitas no laboratório de Física da UFRGS

Outro físico e óptico que trabalhou com difração em abertura circular foi Joseph von Fraunhofer (1787 a 1826), que possui deduções matemáticas mais simples que as formadas pelas figuras de difração de Fresnel, por serem observadas num ponto onde podemos dizer

que seus raios que passam pela abertura e chegam ao anteparo são paralelos. Podendo ser analisada matematicamente como o experimento da fenda dupla. Sua diferença é referente à sua forma circular que exige o fator 1,22 nas suas equações (Halliday, 1995). O primeiro mínimo ou o raio do primeiro anel escuro a contar do centro da figura de difração da abertura circular é dado por:

$$\text{sen}\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}, \text{ onde } d \text{ é o diâmetro da abertura circular.}$$

Na aproximação do anteparo longe da abertura circular, os raios luminosos são localmente paralelos e vale também aqui a aproximação em radianos de $\text{sen}\theta = \theta$, ou seja:

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

5.6 Interferômetro de Mach-Zehnder

Ao pesquisarmos o fenômeno da luz, é comum notarmos a quantidade de livros e artigos que descrevem o experimento da fenda dupla e cálculos referentes a este experimento. Porém, podemos utilizar outros recursos a fim de entendermos os fenômenos de interferência luminosa. Um experimento que tem potencial didático muito satisfatório é o interferômetro de Mach-Zehnder. A divisão do feixe de luz em dois novos feixes e a posterior recombinação para gerar interferência é bastante natural já a primeira vista. O padrão de interferência observado no anteparo é um padrão circular, pois vamos utilizar um *laser* de abertura circular.

Este interferômetro é um instrumento relativamente simples, e foi construído pela primeira vez em 1892. Usamos uma fonte luminosa monocromática, mais especificamente um *laser*, dois espelhos semi-refletores que refletem e transmitem na mesma proporção 50% do feixe incidente, dois espelhos comuns que refletem 100% do raio incidente e dois anteparos para observação do padrão de interferência. A figura 14 foi retirada de um *software* educacional e mostra o arranjo de um interferômetro de Mach-Zehnder. Hoje, temos a nossa disposição esse experimento virtual livre e de fácil acesso, que apresenta diversas possibilidades de aplicações no ensino da óptica ondulatória da Física Moderna (Ricci, et al, 2006).

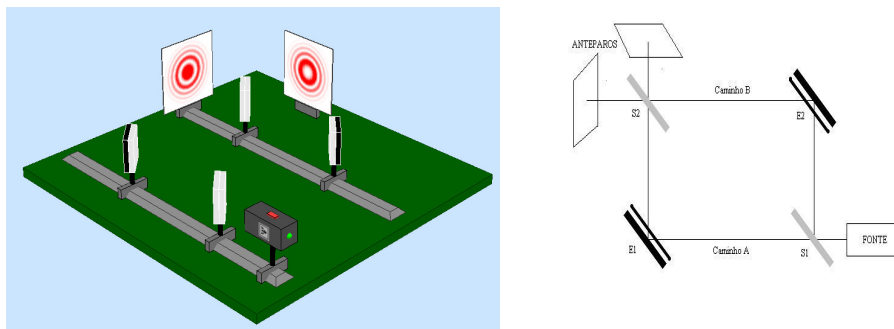


Figura 14 – Interferômetro virtual de Mach-Zehnder obtida do *software* e seu esquema

Imaginemos um modelo deste experimento. Liga-se a fonte luminosa e esta incide sobre o primeiro espelho semi-refletor S_1 tal que 50% da onda incidente é transmitida e segue pelo caminho A e 50% é refletida seguindo pelo caminho B. Ambas as partes, transmitida e refletida, deparam-se com espelhos comuns sendo totalmente refletidas. A onda inicialmente transmitida encontrou o espelho E_1 , e a onda inicialmente refletida encontrou o espelho E_2 . Depois de refletidas em E_1 e E_2 essas ondas se reencontram no segundo espelho semi-refletor S_2 . Nesse espelho, os feixes são recombinados e produzem a imagem de um padrão de anéis claros e escuros alternados nos anteparos. Como podemos observar na figura 14 o centro de um anteparo é iluminado, enquanto que o outro não. Isto ocorre por haver uma diferença de fase entre as ondas: refletida e transmitida, já que não há diferença no caminho percorrido pelas ondas. A distância dos caminhos A e B é igual. Porém toda onda refletida nos semi-espelhos sofre uma mudança de fase de $\lambda/4$ em relação à onda incidente e, toda onda refletida por um espelho comum sofre uma mudança de fase de $\lambda/2$ (Pessoa Jr., 2003). As ondas transmitidas não sofrem mudança de fase ao passarem tanto pelo espelho comum quanto pelo semi-espelho.

Desenvolveremos na seqüência um certo número de experimentações utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder virtual para explorarmos mais especificamente, o fenômeno da interferência da luz. Esse *software* permite que se trabalhe com os fenômenos ondulatórios da luz no regime clássico quando usamos a fonte *laser*. Há, no entanto, uma segunda opção para o uso de uma fonte de fótons únicos, o chamado regime monofotônico, para a qual alguns dos conceitos mais fundamentais da física quântica se tornam necessários para explicar os resultados das simulações. O elo entre esses dois regimes, a luz no regime clássico através do *laser* e a luz no regime quântico, através da fonte monofotônica, pode ser facilmente

construído através de uma boa compreensão da óptica ondulatória. A teoria ondulatória da luz pode *trazer a luz* às várias questões relativas à Física Moderna e à mecânica quântica. A óptica ondulatória é ponte para o aprendizado dos conceitos mais fundamentais e iniciais da Física na escala quântica.

Referências Bibliográficas:

BARTHEM, R. *A luz*. São Paulo: Livraria da Física, v. 2, 2005.

BASSALO, J. M. F. *Fresnel: o formulador matemático da teoria ondulatória da luz*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 79-87, ago. 1988.

GASPAR, A. *Física*, São Paulo: Ática, 2001.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA- GREF. *Física 2*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNICK.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. Rio de Janeiro: LTC, v.4, 1995.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, v. 4, 1998. (livro mais recomendado para leitura final).

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. *Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, Jun. 2005.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; RICCI, T. R. O tratamento clássico do Interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento de fenda dupla na introdução da Física Quântica. . Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-88, 2007.

PESSOA JUNIOR, O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

RAMALHO, F. J.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Os fundamentos da física*. São Paulo, v.2, Editora Moderna, 1999.

Software educacional livre do Interferômetro de Mach-Zehnder. Disponível em:
www.if.ufrgs.br/~fernanda

TIPLER, Paul A. *Física*, São Paulo: LTC-Livros Técnicos e Científicos, v. 4, 2000.

APÊNDICE B – Instruções sobre o *software* e guias experimentais do IMZ.

Temos acesso livre ao *software* do interferômetro de Mach-Zehnder, com sua versão em três idiomas, no sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> ou, se preferirmos, podemos salvá-lo nos nossos microcomputadores ou mesmo em disquete, pois eventualmente a página pode estar “fora do ar” e para não prejudicarmos a nossa aula teremos essas outras opções.

Primeiramente acessamos o sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> que apresenta a seguinte estrutura:

Prof. Fernanda Ostermann
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Interferômetro de Mach-Zehnder
Copyright (c) 2005 Fernanda Ostermann e Sandra Denise Prado
Projeto Edital Universal - 08/2004 do CNPq.

Fernanda Ostermann (Coordenadora do Projeto)
Fávia Rezende (Vice-coordenadora)
Sandra Denise Prado (Colaboradora)
Trieste dos Santos Freire Ricci (Colaborador)
Leandro Augusto Frata Fernandes (Programador)

Esse programa é distribuído gratuitamente e é destituído de qualquer garantia.
Esse programa não é de domínio público.

Gostaríamos de agradecer ao CNPq pelo apoio ao projeto 'Tópicos de Física Moderna e Contemporânea na Formação de Professores e Fundamentos Epistemológicos para a Prática Docente'. Processo 475.851/04-8

Download aqui
[Mach-Zehnder.exe](#)

Então clicamos em Mach-Zehnder.exe e poderemos executar ou salvar o programa no próprio computador ou em disquete, ressalta-se que é importante termos salvo o programa em disquete, por exemplo, pois nem sempre a “rede” está disponível.

Abrindo o programa visualizamos a seguinte apresentação:

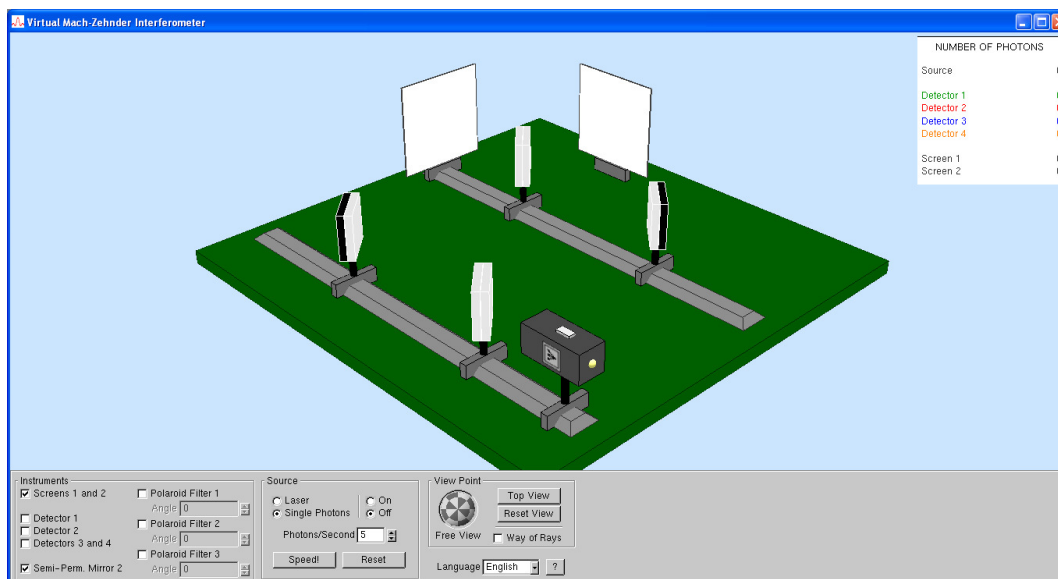


Imagem 1 – interferômetro de Mach-Zehnder

Sugerimos a opção por um idioma (inglês, português ou espanhol) e que venham a interagir com o programa nas opções: Vista Livre, assim será possível visualizar a imagem do interferômetro por vários ângulos, Vista Superior, como o próprio nome diz, teremos a imagem “vista de cima”, Reiniciar Vista que volta a imagem inicial do interferômetro, Ver Feixes mostra a trajetória da Luz. Abaixo temos um esquema mostrando o IMZ, onde E1 e E2 são espelhos comuns (que refletem 100% da luz) e S1 e S2 são espelhos semi-refletores (refletem 50% e transmitem 50% da luz).

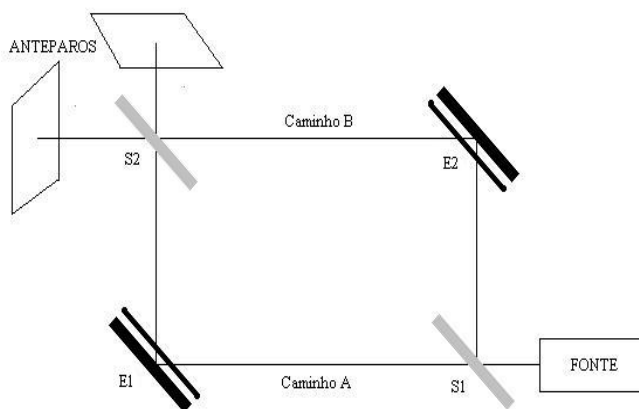


Imagem 2- Esquema do interferômetro de Mach-Zehnder

Já para fonte temos duas opções *laser* (FC) onde se pode colocar ou tirar alguns instrumentos (espelho semi-refletor 2, Filtro Polaróide 1, 2 ou 3) em vários possíveis experimentos que o professor ou os alunos queiram realizar. Estando “montado” o experimento, é só clicar na opção Ligado.

Para a opção fonte Fótons Únicos podemos mudar a velocidade Fótons/Segundo e ainda Acelerar o processo, mandando assim, mais fótons/segundo. Neste tipo de fonte, podemos utilizar todos os instrumentos (espelho semi-refletor 2, Filtro Polaróide 1, 2 ou 3, detectores 1, 2 ou 3 e 4 e os anteparos 1 e 2), porém não é possível trabalhar com todos instrumentos em um só experimento, para colocá-los ou tirá-los basta clicar no quadrado pequeno, de cor branca, na frente da palavra referente ao instrumento. Na imagem 1 aparece um retângulo branco (lado direito) que faz a contagem do número de fótons lançados pela fonte.

Agora que já conhecemos um pouco do programa, vamos trabalhar com alguns guias experimentais.

Sugestão de um guia experimental para o interferômetro virtual de Mach-Zehnder (IMZ)

- 1) Já com o programa aberto, observamos as barras e as ferramentas de que compõem esse *software*.
- 2) Identifique agora o caminho seguido pelos raios luminosos, que é ilustrado em uma animação de um feixe colimado se propagando. Clique em Ver Feixes.
- 3) Identifique os aparatos divisores de feixes (semi-espelhos ou espelhos semi-refletores). Justifique sua resposta.
- 4) Escolha para fonte a opção *laser* e observe o que aparece nos anteparos. Explique o que você vê, lembrando que o feixe de luz refletido no espelho comum muda de fase por um fator de π rad, enquanto o outro a mudança é de $\pi/2$ rad, que corresponde a um avanço de $1/4$ de comprimento de onda da luz.
- 5) Tente explicar esse fenômeno (o resultado obtido nesse experimento). A luz apresenta qual comportamento?

- 6) Agora, remova desse arranjo o espelho semi-refletor 2 e repita todo o processo. Tente explicar esse resultado.
- 7) Você saberia dizer qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nestes dois casos, com e sem o segundo espelho semi-refletor, sabendo apenas que esse feixe de *laser* emitido pela fonte tem intensidade I_0 ?
- 8) Compare os dois experimentos, a que conclusões você chegou a respeito da luz?

Sugestão de outros guias experimentais, agora usando polaróides

Sugestão 1.

- 1) Você saberia dizer o que acontecerá se apresentarmos os polaróides aos experimentos?
- 2) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com o espelho semi-refletor 2. Porém, agora vamos inserir em nosso experimento polaróides. Ative o primeiro polaróide (Filtro Polaróide 1) e ele aparecerá em um dos braços do interferômetro. Clicar na opção: Ligado. Qual o padrão observado nas telas (anteparos)?
- 3) Agora mude o ângulo de seu polaróide para 90° e argumente o que observamos nas telas.
- 4) Analisando as perguntas 2 e 3, é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?
- 5) Com esse mesmo arranjo, acrescente um segundo polaróide (Filtro Polaróide 2), os dois com o ângulo em 90° e ligue o experimento. O que aparece nos anteparos? Agora é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Sugestão 2.

- 1) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com os dois polaróides em ângulos de 90° (Filtro Polaróide 1 e 2). Porém, agora vamos retirar o espelho semi-refletor 2 de nosso experimento, em seguida clicar na opção: Ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?
- 2) Agora mude os ângulos dos polaróides para 180° e argumente o que observamos nas telas.
- 3) Monte um guia experimental usando a fonte *laser* e os polaróides.

Sugestão de guias experimentais, agora usando como fonte fótons únicos

Sugestão 1.

- 1) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que um fóton é emitido por vez¹. Ligue a fonte luminosa em regime monofotônico clicando na opção Fótons Únicos. Observe o que aparece em cada um dos anteparos.
- 2) A partir do que se observa em cada um dos anteparos, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande, como se manifesta o comportamento ondulatório?
- 3) Compare o padrão que vai se formando nos anteparos com o padrão que foi observado quando tínhamos como opção de fonte o *laser*.
- 4) Adicione o detector 1 (D1) ou o detector 2 (D2). Observe os números registrados no canto superior desta janela e repare que uma luzinha acende na fonte, sempre que um fóton é emitido, e quando o fóton passa pelo detector este também acende uma luzinha. Relacione a contagem de fótons no detector escolhido com os números de fótons que chegam aos anteparos. Compare o padrão observado nos anteparos com o padrão para *laser* sem o segundo espelho semi-refletor.
- 5) Ainda nesta situação proposta, qual o efeito do detector 1 ou do detector 2?
- 6) Agora acrescente no outro braço deste aparato o detector 1 ou o detector 2, o que não foi usado na opção anterior. A fonte continua na opção Fótons Únicos. Clique em Ligado. Responda o que você observa nos contadores dos detectores (janela no lado superior) e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte e nas telas? Se você clicar na opção Acelerar, o que você observa nas contagens dos detectores?
- 7) A que conclusões você chegou ao comparar os experimentos cuja fonte era *laser* com os experimentos cuja fonte era fótons únicos?

Sugestão 2.

- 1) Verifique se estão ativadas as opções do espelho semi-refletor e se os anteparos 1 e 2 estão presentes. Ative o primeiro polaróide em 0° (Filtro Polaróide 1) num dos braços do

¹ Veja os artigos de Hogg, C.K. & Mandel, L., em Phys. Ver. Lett. 56, 58 (1986), e o de Grangier, P., Roger, G. & Aspect, A., em Europhysics Letters 1, 173 (1986).

interferômetro. Ligue a fonte em Fótons Únicos e depois de esperar que um número muito grande de fótons saiam da fonte, qual o padrão que você observa nos anteparos?

2) Repita o experimento mudando o ângulo deste polaróide para 90° . Qual padrão você observa nos anteparos?

3) Coloque, agora, o segundo polaróide (Filtro Polaróide 2) no outro braço, cujos ângulos devem ser de 90° . Após um número grande de impactos, o que você observa nas telas?

4) Mude os ângulos para 0° . O que você observa nos anteparos (após um grande número de fótons emitidos)?

5) Conserve o ângulo 0° no Filtro Polaróide 2 e mude para 90° o ângulo do Filtro Polaróide 1. Novamente após ocorrido um grande número de impactos você pode concluir se a fonte é ou não polarizada?

6) Com o mesmo arranjo da questão anterior, retire o segundo espelho semi-refletor e explique o padrão visto nos anteparos. Qual sua conclusão em relação à polarização do fóton?

7) Vamos analisar a seguinte situação: cada fóton é detectado na tela como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

Sugestão 3.

1) Coloque novamente o espelho semi-refletor 2 e inclua nesse novo arranjo os Filtros Polaróides 1 e 2, um em cada braço do experimento, com os **eixos cruzados** em 90° (um deles em 0° e o outro em 90°), esta será uma maneira de sabermos por qual dos braços (caminho) passou cada fóton. Se o fóton passar por um dos braços apenas, terá necessariamente que emergir do interferômetro com sua polarização dada pelo eixo de polaróide que se encontra naquele braço, por isso devemos colocar o Filtro Polaróide 3 colocado entre o espelho semi-refletor 2 e ao anteparo. Tanto faz se o ângulo for de 0° ou 90° , pois o eixo de polarização será paralelo a um polaróide e ortogonal ao outro, de maneira que o fóton que chegar a tela terá passado pelo braço onde se encontrava o polaróide com eixo paralelo ao do terceiro polaróide. Façamos isso.

2) Gradue o polarizador 1 (Filtro Polaróide 1) em 0° ou em 360° , coloque o terceiro polaróide na saída do interferômetro e gradue seu ângulo de modo que seu eixo seja paralelo ao primeiro polaróide. Já o segundo gradue em 90° ou 270° , em seguida ligue a fonte em regime

monofotônico, ou seja, opção Fótons Únicos, e espere até que se acumule um grande número de impactos. O que você observa?

3) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo posição dentro do interferômetro? E quando não se observa esse padrão de interferência? Por quê?

4) Um argumento óbvio é que o fóton poderia ter se dividido em duas partes no primeiro separador de feixe, atravessado o aparelho e, de alguma forma, ter recombinado-se no segundo separador de feixe. Verifique se isso é verdade ou não.

5) Troque os dois polaróides 1 e 2 por dois detectores de fótons. Verifique através da luzinha que tem em cada detector se existe simultaneidade com a entrada de cada fóton individual no aparelho. O que você observa?

6) Com os dois espelhos semi-espelhos presentes no interferômetro e somente com os dois detectores de fótons, D3 e D4, colocados, respectivamente, sobre o eixo central das saídas 1 e 2 do aparelho, qual seria a probabilidade do fóton ser detectado por D3? E por D4?

7) O que você sugeriria para melhorar este *software*?

APÊNDICE C – Texto de apoio ao professor de Física II.

**Alguns dos princípios mais fundamentais da física quântica à luz
do interferômetro virtual de Mach-Zehnder**

Esse é um texto bastante introdutório e sucinto sobre algumas das questões relativas aos princípios mais fundamentais da física quântica (FQ) – o princípio da superposição - que podem ser trabalhadas com o recurso do *software* do interferômetro de Mach-Zehnder. É importante ressaltar que um trabalho mais extensivo no *software* em regime clássico permite uma melhor compreensão dos resultados das simulações no regime quântico ou, também dito, monofônico (um fóton de cada vez). É, portanto, fortemente recomendado que se esgote os recursos do *software* no regime clássico antes de qualquer investida no regime monofônico.

Luz é simplesmente luz ou uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo com uma velocidade de cerca de $3 \cdot 10^8$ m/s. Ela transporta energia através do vácuo cuja medida é dada pelo que chamamos de intensidade da luz. A intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado da amplitude da onda. No caso da luz, em particular, a intensidade da luz é proporcional ao quadrado da amplitude de seu campo elétrico. Esses conceitos todos são os conceitos clássicos da luz. O que queremos dizer, então, com o regime quântico da luz?

A física quântica parece algo muito incomum e surpreendentemente estranha. Ela foge ao nosso bom senso e fica difícil descrever seus fenômenos com a percepção que ganhamos da natureza ao longo de nossas vidas. E de fato, a FQ é realmente incomum para a escala de percepção dos nossos sentidos, pois sua escala de atuação é o mundo microscópico nas dimensões de alguns Angstroms. Divida um centímetro um milhão de vezes e então esse resultado por cem – essa é a escala de domínio da FQ. Ela nos diz que os fenômenos físicos nessa escala são realmente diferentes dos fenômenos físicos da escala macroscópica: e por que teriam que ser os mesmos?

Parece natural agora que para observarmos a luz no regime quântico, não possamos simplesmente olhar através da janela e observar algo lá fora – as condições ideais estão em laboratórios sofisticados ou em resultados microscópicos, para os quais, a teoria que

explica o fenômeno tenha raiz na FQ, mas que o fenômeno microscópico em si, não pode ser diretamente visualizado – a radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico são fenômenos macroscópicos que mostram indiretamente a natureza quântica da luz (Halliday 1995, Tipler 2000, Hewitt 2002, GREF 2005, Ramalho 1999). Aliás, foi para explicar a radiação emitida por um corpo em equilíbrio térmico em um forno à temperatura T (a radiação de corpo negro), que Max Karl Ernest Ludwig Planck (1858-1947) em 1900, se deparou com a dificuldade de usar uma teoria clássica para a luz. Para conseguir ajustar sua teoria aos dados experimentais, Planck percebeu que a intensidade de uma onda eletromagnética não poderia mais ser dada em termos do quadrado da amplitude do campo elétrico, mas sim em termos do número de fótons, sendo que cada fóton tem uma energia bem determinada pela frequência da onda. Dessa forma, segundo Planck, se uma onda eletromagnética com frequência ν tem N fótons, então a energia do fóton é $E=h\nu$, sendo $h = 6,626196 \cdot 10^{-34}$ J.s a constante de Planck e a energia total é $Nh\nu$. A idéia de Planck foi usada com sucesso por Niels Henrik David Bohr (1885-1962) para modelar o átomo de hidrogênio e explicar os saltos quânticos, isto é, as transições eletrônicas entre os estados de energia permitidos com a absorção ou emissão de fótons. A natureza quantizada da FQ aparece nas energias permitidas que o elétron pode ter em um átomo. Costumamos dizer que o espectro de energia dos átomos é discreto, que é o mesmo que dizer quantizado, o que faz entender que os átomos não podem emitir ou absorver luz de todas as cores, mas somente as cores específicas para o átomo em questão. Aqui, falamos de cores, para dar mais vida ao texto. Para sermos mais precisos, deveríamos falar em frequências, pois um átomo pode emitir ou absorver fótons com frequências além do espectro visível.

O termo fóton propriamente foi estabelecido por Einstein em seu trabalho sobre o Efeito Fotoelétrico (1905) - os fótons de uma luz podem, sob certas condições, arrancar elétrons de uma placa metálica. Na época de Planck, o termo usado era *quantum* (grão de luz, partícula de luz). O plural de *quantum* é *quanta* (Barthen, 2005) e decorre disso o nome de física quântica. Tanto a teoria ondulatória da luz quanto a teoria dos quanta descrevem bem a luz, mas precisamos estar conscientes de que a luz mostra essas duas facetas – onda e corpúsculos – em situações físicas bem diferentes. Ou usamos uma teoria com sucesso ou outra – as duas teorias não podem descrever a mesma experiência com sucesso – princípio da complementaridade (Halliday 1995, Pessoa Jr. 2003).

Para ganhar um pouco de intuição sobre o regime quântico da luz, vamos realizar um experimento mental: pense que você está próximo de uma vela em um quarto escuro. Imagine que não haja nada mais além de você mesmo e a vela no quarto e que as dimensões do quarto sejam realmente grandes, tão grandes que poderíamos considerar um quarto de dimensões cosmológicas. Agora, supomos que a vela produza um número muito grande de fótons por segundo. Próximo da vela, seus olhos captaram muitos e muitos fótons por segundo e o que você observa pode ser descrito pela teoria clássica da luz. Suponha agora que você se afaste da vela. Os fótons são emitidos em todas as direções e se propagam em linha reta de forma que seus olhos recebem somente parte dos fótons emitidos a cada segundo. Então você vê a vela perdendo intensidade. Afaste-se ainda mais e mais – haverá alguma distância a partir da qual, seus olhos detectarão apenas um pontinho de luz e ocasionalmente outro em outro instante. Você está tão distante que a esfera na qual os N fótons se distribuem tem um raio muito grande. A possibilidade de um fóton atingir sua retina diminui com a sua distância da vela. Essa situação poderia, grosseiramente, representar uma fonte monofotônica ou o regime quântico da luz.

A maioria dos livros didáticos elege a experiência da dupla fenda de Young para trabalhar os fenômenos ondulatórios da luz, pois a experiência pode ser realizada em um laboratório, usando-se um *laser* com resultados visuais de grande impacto. No entanto, essa experiência é também transportada para os textos introdutórios de Física Moderna para mostrar o princípio da superposição na FQ e não é nada natural para o aluno a transposição do conceito de onda para o entendimento que o fóton (a partícula de luz) se comporta como onda nessa experiência e como corpúsculo em outras situações. Essa é a dualidade onda-partícula para a luz.

A dualidade onda-partícula é mais um entre os fundamentos da FQ. A dualidade onda-partícula foi proposta por Einstein em 1905 e generalizada por Louis de Broglie (1892-1987) em 1925 para qualquer corpo de massa m com uma velocidade v . Corpos macroscópicos também exibiriam, por princípio, dualidade onda-partícula, mas essa dualidade não pode ser detectada com a precisão dos instrumentos atuais. O princípio de de Broglie atribui um comprimento de onda de matéria λ_B para a partícula com momentum linear $p=mv$: $\lambda_B = \frac{h}{p}$.

Dessa forma, elétrons, prótons, nêutrons, átomos e partículas da escala atômica e subatômica podem se comportar como ondas em algumas situações e como partículas em outras.

Atualmente são classificadas como Física Clássica a mecânica clássica, a termodinâmica e o eletromagnetismo clássico. A dita Física Moderna se refere aos primórdios da física quântica nos anos entre o advento da constante de Planck em 1900 e até meados de 1930, quando a teoria quântica já estava bem mais formalizada. A partir de 1930 costumamos nos referir a uma mecânica quântica ou física quântica (FQ). A relatividade especial e a relatividade geral de Einstein progrediram também nos tempos da Física Moderna. Podemos dizer que a FQ abrange as questões da superposição de ondas, a dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza, o problema do colapso da onda ou o problema da medida, o determinismo versus indeterminismo, o salto quântico entre outros.

O interferômetro virtual de Mach-Zehnder permite trabalhar os conceitos de superposição, dualidade onda-partícula, o problema da medida e do indeterminismo, de modo quase que natural e com algum cuidado, o princípio da incerteza é trabalhado com alunos de disciplinas introdutórias em nível de graduação. Para o Ensino Médio a parte mais acessível aos estudantes é a questão de por qual caminho rumou o fóton e, portanto, a discussão do princípio da superposição e do colapso da onda. A óptica ondulatória serve aqui de base para a elaboração de conceitos novos. Não podemos esquecer que se passarmos do regime monofotônico para o regime de muitos fótons de cada vez, os resultados ondulatórios clássicos são recuperados (princípio da correspondência de Bohr) (Halliday, 1995).

Abaixo colocamos algumas situações para você experimentar virtualmente diferentes arranjos experimentais e perceber o surgimento ou não de um padrão de interferência no anteparo. Quando a fonte é *laser* ou mesmo fótons únicos, temos um padrão de interferência no anteparo, devido à superposição de ondas. Quando emitimos um fóton por vez, diminuimos a intensidade da fonte a ponto de emitir um único fóton de cada vez e observamos uma detecção pontual do fóton no anteparo, ou seja, característica de um comportamento corpuscular. Entretanto, a posição detectada no anteparo segue um padrão de interferência igual àquele obtido quando ligamos o *laser*. Isso leva o aluno a se questionar que tipo de comportamento o fóton apresenta afinal: ondulatório ou corpuscular? Engajados nesta dúvida, abordamos conceitos da FQ como, por exemplo, a dualidade onda-partícula. É natural que esse tipo de discussão exija do professor algumas leituras adicionais (Halliday

1995, Hewitt 2002, Eisberg 1988, Tipler 2000). Há também muitos artigos nas revistas brasileiras de ensino de Física (Ostermann e Prado 2005, Ostermann e Ricci 2004, Ostermann e Ricci 2005, Ostermann, Padro e Ricci 2007, Barros 1999, Sales 2008, Terrazzan 1992) que abordam essa temática.

Com o uso de detectores sobre os braços do interferômetro podemos, sondar por qual caminho rumou o fóton, mas a consequência dessa tentativa inocente de seguir o fóton resulta em uma destruição do padrão de interferência. Aqui podemos discutir o problema da medida e o caráter corpuscular do fóton. Colocando-se um detector em cada braço do IMZ podemos acompanhar em várias medidas se o fóton vai pelo braço superior ou pelo braço inferior (caminho A ou B). Vamos observar que ele vai por um braço ou por outro de modo aleatório de forma que se perguntarmos a um estudante antes de emitir um fóton, por qual braço ele irá, a melhor resposta será aquela que diz que ele poderá ir tanto por um braço quanto por outro com 50% de chance. Poderemos entrar aí com a discussão do princípio da incerteza, que decorre do caráter estatístico e probabilístico da FQ. Temos ainda a opção de substituímos os detectores por polarizadores para simular o bloqueio de um dos caminhos de forma que teremos certeza sobre o caminho pelo qual ruma o fóton. Novamente, essa experiência com polarizadores reforça os resultados das simulações com detectores.

Dizemos que no mundo quântico, uma certeza na posição leva a uma incerteza grande no momentum (padrão interferência) e vice-versa. No IMZ, o conhecimento da trajetória do fóton destrói o padrão de interferência. O fato de não conseguirmos medir uma grandeza sem afetar uma segunda conjugada à primeira, mostra que por mais elaborado ou preciso ou pouco demolidor que seja o aparelho detector de fótons ou elétrons, certas medidas poderão causar uma incerteza muito grande no conhecimento de uma outra grandeza. Esse fenômeno é intrínseco na FQ e não depende do aparelho de medida em si. O caráter probabilístico, o princípio da superposição, o princípio da incerteza são todos fenômenos associados ao modelo ondulatório do mundo microscópico. O problema da medida é um fenômeno da interação da experiência em regime quântico com os aparelhos de medida, que representam o mundo macroscópico, um problema ainda em aberto na Física.

Referências Bibliográficas:

BASSALO, J. M. F. *Fresnel: o formulador matemático da teoria ondulatória da luz*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 79-87, ago. 1988.

BARROS, J. A.; CAVALCANTE, M. A.; JARDIM, V. *Inserção de física moderna no ensino médio: difração de um feixe laser*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v.16, n. 2, p. 154-169, ago 1999.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA- GREF. *Física 2*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

EISBERG, R. RESNICK, R. *Física Quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

HALLIDAY, D.; RESNICK.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 1995.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, v. 4, 1998. (livro mais recomendado para leitura final)

OSTERMANN, F.; PRADO S.D. *Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, Jun. 2005

OSTERMANN, F.; RICCI, T.F. *Construindo uma unidade didática conceitual sobre mecânica quântica: um estudo na formação de professores de física*. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. *Conceitos de física quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 22, n. 01, p. 9-35, 2005.

OSTERMANN, F.;PRADO, S. D., RICCI, T. R. *O tratamento clássico do Interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento de fenda dupla na introdução da Física Quântica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-88, 2007.

PESSOA JUNIOR, O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

RAMALHO, F. J.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Os fundamentos da física*. São Paulo, v. 2, Editora Moderna, 1999.

RAMALHO, F. J.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Os fundamentos da física*. São Paulo, v. 3, Editora Moderna, 1999.

SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H.; CASTRO FILHO, J. A.; PEQUENO, M. C. *Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 30, n. 3, 2008.

Software educacional livre do Interferômetro de Mach-Zehnder. Disponível em:
<www.if.ufrgs.br/~fernanda>

TERRAZZAN, E.A. *A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez 1992.

TIPLER, P. A. *Física*, São Paulo, v. 4, LTC-Livros Técnicos e Científicos, 2000.

APÊNDICE D – Guias experimentais com respostas, realizados durante o curso.

Nome: *Paula*

Sugestão de um guia experimental para o interferômetro virtual de Mach-Zehnder (IMZ)

Temos acesso livre ao *software* do interferômetro de Mach-Zehnder, com sua versão em três idiomas, no sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> ou se preferirmos podemos salvá-lo nos nossos microcomputadores ou mesmo em disquete, digo isso, pois eventualmente a página pode estar “fora do ar” e para não prejudicarmos a nossa aula teremos essas outras opções.

- 1) Já com o programa aberto, observamos as barras e as ferramentas de que compõem esse *software*.
- 2) Identifique agora o caminho seguido pelos raios luminosos, que é ilustrado em uma animação de um feixe colimado se propagando. Clique em Ver Feixes.
- 3) Identifique os aparatos divisores de feixes (semi-espelhos ou espelhos semi-refletores). Justifique sua resposta.

São semi-espelhos porque ao mesmo tempo transmitem e refletem os feixes de onda.

- 4) Escolha para fonte a opção *laser* e observe o que aparece nos anteparos. Explique o que você vê, lembrando que o feixe de luz refletido no espelho comum muda de fase por um fator de π rad, enquanto o outro a mudança é de $\pi/2$ rad, que corresponde a um avanço de $1/4$ de comprimento de onda da luz.

Vê-se um padrão de interferência. Os espelhos e semi-espelhos provocam defasagens características que resultam numa interferência construtiva, no espaço 1 e uma interferência destrutiva no espaço 2.

- 5) Tente explicar esse fenômeno (o resultado obtido nesse experimento). A luz apresenta qual comportamento?

A luz apresentou comportamento de onda.

- 6) Agora, remova desse arranjo o espelho semi-refletor 2 e repita todo o processo. Tente explicar esse resultado.

Desaparecem as interferências, tanto a construtiva quanto a destrutiva. O espelho semi-refletor 2 provocava defasagens, e como consequência interferências.

7) Você saberia dizer qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nestes dois casos, com e sem o segundo espelho semi-refletor, sabendo apenas que esse feixe de *laser* emitido pela fonte tem intensidade I_0 ?

Com o 2º espelho: no anteparo 1 a luz refletida tem a mesma intensidade que a luz emitida pela fonte e no anteparo 2 não há luminosidade devido à interferência destrutiva.

Sem o segundo espelho a intensidade luminosa fica reduzida nos dois anteparos.

8) Compare os dois experimentos, a que conclusões você chegou a respeito da luz?

Com o 2º espelho semi-refletor percebe-se que ocorreu o fenômeno da interferência, provocando superposição de ondas. Sem o espelho acontece apenas o cruzamento dos raios de luz, sem interferência.

Sugestão de outros guias experimentais, agora usando polaróides

Sugestão 1.

1) Você saberia dizer o que acontecerá se apresentarmos os polaróides aos experimentos?

Deixando os filtros polaróides em ângulo de 0° , na altura o experimento.

2) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com o espelho semi-refletor 2. Porém, agora vamos inserir em nosso experimento polaróides. Ative o primeiro polaróide (Filtro Polaróide 1) e ele aparecerá em um dos braços do interferômetro. Clicar na opção: Ligado. Qual o padrão observado nas telas (anteparos)?

Não alterou nenhum dos feixes luminosos.

3) Agora mude o ângulo de seu polaróide para 90° e argumente o que observamos nas telas.

A luz não passará para o espelho 1, apenas para o espelho 2 e ao chegar no espelho semi-refletor 2, ficou dividida (parte refletida e parte transmitida) chegando a cada anteparo com metade da intensidade.

4) Analisando as perguntas 2 e 3, é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Sim, é polarizada em 180° , pois com o polaróide em 90° não há passagem de luz.

5) Com esse mesmo arranjo, acrescentando um segundo polaróide (Filtro Polaróide 2), os dois com o ângulo em 90° , e ligue o experimento. O que aparece nos anteparos? Agora é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Nos anteparos não aparece nada, pois em nenhum deles aparece nenhuma luminosidade provando que a luz na fonte é polarizada.

Sugestão 2.

1) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com os dois polaróides em ângulos de 90° (Filtro Polaróide 1 e 2). Porém, agora vamos retirar o espelho semi-refletor 2 de nosso experimento, em seguida clicar na opção: Ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?

Nada é visto nos anteparos provando que esta fonte emite luz polarizada em 180° .

2) Agora mude os ângulos dos polaróides para 180° e argumente o que observamos nas telas.

A luz emitida está com o mesmo ângulo da polarização que os filtros, portanto passa levemente e os feixes incidem diretamente nos anteparos.

3) Monte um guia experimental usando a fonte *laser* e os polaróides.

Não realizou a tarefa.

Sugestão de guias experimentais, agora usando como fonte fótons únicos**Sugestão 1.**

1) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que um fóton é emitido por vez. Ligue a fonte luminosa em regime monofotônico clicando na opção Fótons Únicos. Observe o que aparece em cada um dos anteparos.

2) A partir do que se observa em cada um dos anteparos, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande, como se manifesta o comportamento ondulatório?

*O fóton se comporta como partícula na emissão e na chegada no anteparo. No caminho ele muda seu comportamento como se fosse onda, aparecendo nos anteparos figuras semelhantes àquelas que formaram com a fonte *laser*, com interferência. O fóton escolhe ora um, ora outro caminho para os anteparos.*

3) Compare o padrão que vai se formando nos anteparos com o padrão que foi observado quando tínhamos como opção de fonte o *laser*.

*O padrão é idêntico ao da fonte de *laser*. Cria-se então o princípio da dualidade onda-partícula.*

4) Adicione o detector 1 (D1) ou o Detector 2 (D2). Observe os números registrados no canto superior desta janela e repare que uma luzinha acende na fonte, sempre que um fóton é emitido, e quando o fóton passa pelo detector este também acende uma luzinha. Relacione a contagem de fótons no detector escolhido com os números de fótons que chegam aos anteparos. Compare o padrão observado nos anteparos com o padrão para *laser* sem o segundo espelho semi-refletor.

O detector 1 destrói aproximadamente 50% dos fótons e nos anteparos chegam aproximadamente 25% dos fótons emitidos, em cada um deles. O detector (macro) “acaba” com alguns fótons e desaparece a interferência e todas as outras medidas (micro). Comparando-se os padrões, vê-se que eles são semelhantes, apenas o do laser é uma “macha” (luz) enquanto que o de fótons é pontual.

5) Ainda nesta situação proposta, qual o efeito do detector 1 ou do detector 2?

Cada detector destrói aproximadamente 50% dos fótons. Com os dois colocados simultaneamente nada aparece nos anteparos, pois os fótons não passam.

6) Agora acrescente no outro braço deste aparato o detector 1 ou o detector 2, o que não foi usado na opção anterior. A fonte continua na opção Fótons Únicos. Clique em Ligado. Responda o que você observa nos contadores dos detectores (janela no lado superior) e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte e nas telas? Se você clicar na opção Acelerar, o que você observa nas contagens dos detectores?

Nos contadores dos detectores observa-se que os valores variam de forma parelha. As lâmpadas acendem-se alternadamente, ora uma, ora outra. Nas telas não se observa a chegada de fótons, pois os mesmos são destruídos pelos detectores que estão no caminho. Opção “acelerar” percebe-se que os números crescem rapidamente de forma a ficar a metade em cada detector.

7) A que conclusões você chegou ao comparar os experimentos cuja fonte era *laser* com os experimentos cuja fonte era fótons únicos?

Com a fonte laser percebe-se um padrão de ondas, com interferências. Com os fótons, percebe-se a dualidade onda-partícula. Ora com comportamento de onda, ora com comportamento de partícula.

Sugestão 2.

1) Verifique se estão ativadas as opções do espelho semi-refletor e se os anteparos 1 e 2 estão presentes. Ative o primeiro polaróide em 0° (Filtro Polaróide 1) num dos braços do interferômetro. Ligue a fonte em Fótons Únicos e depois de esperar que um número muito grande de fótons saiam da fonte, qual o padrão que você observa nos anteparos?

Observa-se um padrão de comportamento ondulatório, pois vê-se interferência, mesmo chegando de forma pontual, vê-se aproximadamente 50% dos fótons chegando em cada anteparo.

2) Repita o experimento mudando o ângulo deste polaróide para 90° . Qual padrão você observa nos anteparos?

Perdeu-se o padrão de onda, com interferências na tela. Como no caminho o fóton se comporta como onda, o filtro bloqueia a passagem dele aparecendo nos anteparos apenas os fótons que foram refletidos pelo 1º espelho semi-refletor.

3) Coloque, agora, o segundo polaróide (Filtro Polaróide 2) no outro braço, cujos ângulos devem ser de 90° . Após um número grande de impactos, o que você observa nas telas?

Apesar do grande número de fótons emitidos, nada aparece nos anteparos (telas). Pelo comportamento ondulatório dos fótons, eles não conseguem passar pelos filtros.

4) Mude os ângulos para 0° . O que você observa nos anteparos (após um grande número de fótons emitidos)?

Observa-se que pelo comportamento ondulatório dos fótons no caminho, eles passam livremente pelos filtros e nas telas aparecem pontos com figuras que parecem ondas com interferências.

5) Conserve o ângulo 0° no Filtro Polaróide 2 e mude para 90° o ângulo do Filtro Polaróide 1. Novamente após ocorrido um grande número de impactos você pode concluir se a fonte é ou não polarizada?

Sim, a fonte é polarizada em $0^\circ/180^\circ$, pois o filtro 1 barrou a passagem dos fótons por estar em 90° . Sabe-se então que os fótons que aparecem dispersos nas telas vieram pelo caminho 2.

6) Com o mesmo arranjo da questão anterior, retire o segundo espelho semi-refletor e explique o padrão visto nos anteparos. Qual sua conclusão em relação à polarização do fóton?

O fóton está deslocando-se somente pelo caminho 2 e chegando direto no anteparo 1 com uma polarização de 0° ou 180° . Por esse motivo, não passa no filtro 1, que está orientado em 90° .

7) Vamos analisar a seguinte situação: cada fóton é detectado na tela como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o

fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

Não é bem definido, pois no momento em que definimos a posição, deixa de existir a interferência. Na física clássica, para definir bem uma grandeza, não é necessário que outra seja destruída.

Proposta: colocar os dois filtros em 0° - observa-se interferência – posição não definida dos fótons;

Após coloca-se um dos filtros em 90° - observa-se que desaparece a interferência e sim pontos dispersos – caminho definido.

Sugestão 3.

1) Coloque novamente o espelho semi-refletor 2 e inclua nesse novo arranjo os Filtros Polaróides 1 e 2, um em cada braço do experimento, com os **eixos cruzados** em 90° (um deles em 0° e o outro em 90°), esta será uma maneira de sabermos por qual dos braços (caminho) passou cada fóton. Se o fóton passar por um dos braços apenas, terá necessariamente que emergir do interferômetro com sua polarização dada pelo eixo de polaróide que se encontra naquele braço, por isso devemos colocar o Filtro Polaróide 3 colocado entre o espelho semi-refletor 2 e ao anteparo. Tanto faz se o ângulo for de 0° ou 90° , pois o eixo de polarização será paralelo a um polaróide e ortogonal ao outro, de maneira que o fóton que chegar a tela terá passado pelo braço onde se encontrava o polaróide com eixo paralelo ao do terceiro polaróide. Façamos isso.

2) Gradue o polarizador 1 (Filtro Polaróide 1) em 0° ou em 360° , coloque o terceiro polaróide na saída do interferômetro e gradue seu ângulo de modo que seu eixo seja paralelo ao primeiro polaróide. Já o segundo gradue em 90° ou 270° , em seguida ligue a fonte em regime monofotônico, ou seja, opção Fótons Únicos, e espere até que se acumule um grande número de impactos. O que você observa?

Observa-se uma dispersão de pontos nos dois anteparos que vieram pelo caminho 1, pois o filtro 2 não permitiu a passagem dos fótons.

3) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo posição dentro do interferômetro? E quando não se observa esse padrão de interferência? Por quê?

Temos acesso livre ao *software* do interferômetro de Mach-Zehnder, com sua versão em três idiomas, no sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> ou se preferirmos podemos salvá-lo nos nossos microcomputadores ou mesmo em disquete, digo isso, pois eventualmente a página pode estar “fora do ar” e para não prejudicarmos a nossa aula teremos essas outras opções.

1) Já com o programa aberto, observamos as barras e as ferramentas de que compõem esse *software*.

2) Identifique agora o caminho seguido pelos raios luminosos, que é ilustrado em uma animação de um feixe colimado se propagando. Clique em Ver Feixes.

3) Identifique os aparatos divisores de feixes (semi-espelhos ou espelhos semi-refletores). Justifique sua resposta.

São espelhos semi-refletores.

4) Escolha para fonte a opção *laser* e observe o que aparece nos anteparos. Explique o que você vê, lembrando que o feixe de luz refletido no espelho comum muda de fase por um fator de π rad, enquanto o outro a mudança é de $\pi/2$ rad, que corresponde a um avanço de $1/4$ de comprimento de onda da luz.

Em um dos anteparos aparece com centro luminoso, ocorre uma interferência construtiva e, no outro não aparece, ocorreu uma interferência destrutiva.

5) Tente explicar esse fenômeno (o resultado obtido nesse experimento). A luz apresenta qual comportamento?

No espelho semi-refletor 2, as ondas se encontram, e a imagem formada em cada anteparo se dá pela interferência de ambos devido à diferença de fase entre as ondas refletidas e transmitidas, temos o padrão de interferência.

6) Agora, remova desse arranjo o espelho semi-refletor 2 e repita todo o processo. Tente explicar esse resultado.

Retirando o espelho semi-refletor 2 houve uma dispersão, pois terminou a superposição de ondas, e a onda de luz se espalha no anteparo.

7) Você saberia dizer qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nestes dois casos, com e sem o segundo espelho semi-refletor, sabendo apenas que esse feixe de *laser* emitido pela fonte tem intensidade I_0 ?

A intensidade inicial é igual a intensidade de chegada, no anteparo.

8) Compare os dois experimentos, a que conclusões você chegou a respeito da luz?

Sugestão de outros guias experimentais, agora usando polaróides

Sugestão 1.

1) Você saberia dizer o que acontecerá se apresentarmos os polaróides aos experimentos?

Conforme o valor do ângulo apresentado no polaróide a onda de luz passará ou não.

2) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com o espelho semi-refletor 2. Porém, agora vamos inserir em nosso experimento polaróides. Ative o primeiro polaróide (Filtro Polaróide 1) e ele aparecerá em um dos braços do interferômetro. Clicar na opção: Ligado. Qual o padrão observado nas telas (anteparos)?

Em um anteparo aparece o cetro luminoso (interferência construtiva) e no outro não (interferência destrutiva).

3) Agora mude o ângulo de seu polaróide para 90° e argumente o que observamos nas telas.

Houve uma dispersão nos dois anteparos, pois a onda de luz sai num ângulo de 180° e encontra o polaróide a 90° e a onda de luz não passa por ele. A luz que chega ao anteparo e pela onda que se reflete no primeiro espelho.

4) Analisando as perguntas 2 e 3, é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Será polarizado em 180° e 0° , se for à 90° e 270° não será polarizado.

5) Com esse mesmo arranjo, acrescente um segundo polaróide (Filtro Polaróide 2), os dois com o ângulo em 90° , e ligue o experimento. O que aparece nos anteparos? Agora é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Não aparece nada nos anteparos. A fonte é polarizada em 0° ou 180° .

Sugestão 2.

1) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com os dois polaróides em ângulos de 90° (Filtro Polaróide 1 e 2). Porém, agora vamos retirar o espelho semi-refletor 2 de nosso experimento, em seguida clicar na opção: Ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?

Nos anteparos não aparece nada. É polarizado para um ângulo de 0° ou 180° .

2) Agora mude os ângulos dos polaróides para 180° e argumente o que observamos nas telas.

À 180° temos uma dispersão de onda de luz.

3) Monte um guia experimental usando a fonte *laser* e os polaróides.

I – Usando a fonte e com dois polaróides em um ângulo de 180° , o que aparece nos anteparos?

Resposta: A fonte é polarizada em 180° , em um dos anteparos ocorre o fenômeno da interferência construtiva (centro luminoso) e no outro anteparo interferência destrutiva.

II – Usando a fonte laser com dois polaróides em um ângulo de 180° e o polaróide 3 em um ângulo de 90° observe o que acontece nos anteparos. Explique.

Resposta: A fonte é polarizada em 180° , a onda de luz passa pelos polaróides 1 e 2 e no 3 não, pois se encontra à 90° . Assim em um dos anteparos temos uma interferência destrutiva e no outro não aparece nada porque o polaróide 3, à 90° , que se encontra a frente do anteparo bloqueia a passagem da onda de luz polarizada à 180° .

Sugestão de guias experimentais, agora usando como fonte fótons únicos

Sugestão 1.

1) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que um fóton é emitido por vez. Ligue a fonte luminosa em regime monofotônico clicando na opção Fótons Únicos. Observe o que aparece em cada um dos anteparos.

2) A partir do que se observa em cada um dos anteparos, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande, como se manifesta o comportamento ondulatório?

Comportamento corpuscular sai da fonte e chega como partícula, aparecendo em um anteparo e depois no outro, alternando-se.

O comportamento ondulatório se manifesta com padrão de interferência, em um construtivo e o outro destrutivo.

3) Compare o padrão que vai se formando nos anteparos com o padrão que foi observado quando tínhamos como opção de fonte o laser.

O padrão que está se formando no anteparo é parecido com o formado da fonte a laser, uma interferência construtiva e a outra destrutiva.

4) Adicione o detector 1 (D1) ou o detector 2 (D2). Observe os números registrados no canto superior desta janela e repare que uma luzinha acende na fonte, sempre que um fóton é

emitido, e quando o fóton passa pelo detector este também acende uma luzinha. Relacione a contagem de fótons no detector escolhido com os números de fótons que chegam aos anteparos. Compare o padrão observado nos anteparos com o padrão para *laser* sem o segundo espelho semi-refletor.

Quando o fóton passa pelo detector são destruídos, não chegam no anteparo. Assim observa-se que no anteparo não se forma uma interferência, ocorre uma dispersão do fóton. Comparando com um laser, também ocorre uma dispersão.

5) Ainda nesta situação proposta, qual o efeito do detector 1 ou do detector 2?

O detector serve para mostrar onde o fóton está passando, qual o caminho que seguiu, com isso acaba destruindo o padrão de interferência.

6) Agora acrescenta no outro braço deste aparato o detector 1 ou o detector 2, o que não foi usado na opção anterior. A fonte continua na opção Fótons Únicos. Clique em Ligado. Responda o que você observa nos contadores dos detectores (janela no lado superior) e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte e nas telas? Se você clicar na opção Acelerar, o que você observa nas contagens dos detectores?

Se ligar os detectores 1 e 2, no anteparo não aparece nada, nos contadores dos detectores, observa-se que ele apenas conta, porém nada aparece no anteparo, porque eles detectam o fóton.

7) A que conclusões você chegou ao comparar os experimentos cuja fonte era *laser* com os experimentos cuja fonte era fótons únicos?

O fóton sai como partícula e chega como partícula, isso ocorre porque no caminho que percorre seu comportamento é ondulatório. Sendo ondulatório o seu comportamento, teremos os padrões de interferência que ocorre na fonte do laser.

Sugestão 2.

1) Verifique se estão ativadas as opções do espelho semi-refletor e se os anteparos 1 e 2 estão presentes. Ative o primeiro polaróide em 0° (Filtro Polaróide 1) num dos braços do interferômetro. Ligue a fonte em Fótons Únicos e depois de esperar que um número muito grande de fótons saiam da fonte, qual o padrão que você observa nos anteparos?

O padrão de interferência, em um ocorre uma interferência destrutiva e no outro uma interferência construtiva.

2) Repita o experimento mudando o ângulo deste polaróide para 90° . Qual padrão você observa nos anteparos?

Ocorre a dispersão do fóton, não formando nenhuma figura, apenas pontos.

3) Coloque, agora, o segundo polaróide (Filtro Polaróide 2) no outro braço, cujos ângulos devem ser de 90° . Após um número grande de impactos, o que você observa nas telas?

Nada existe nas telas, porque como o fóton se comporta como uma onda no caminho que ele percorre, sai da fonte num ângulo de 180° ou 0° , e o polaróide se encontra a 90° , ele não consegue passar.

4) Mude os ângulos para 0° . O que você observa nos anteparos (após um grande número de fótons emitidos)?

Ocorre uma interferência, e nas telas pode-se observar que em um aparece o centro luminoso (interferência construtiva) e no outro ocorre interferência destrutiva.

5) Conserve o ângulo 0° no Filtro Polaróide 2 e mude para 90° o ângulo do Filtro Polaróide 1. Novamente após ocorrido um grande número de impactos você pode concluir se a fonte é ou não polarizada?

Nos anteparos temos uma dispersão do fóton. Analisando os números de fótons: o número de fótons que chega nos anteparos é a metade do nº de fótons que sai da fonte, porque na polarização 1 está a 90° e o fóton não passa.

6) Com o mesmo arranjo da questão anterior, retire o segundo espelho semi-refletor e explique o padrão visto nos anteparos. Qual sua conclusão em relação à polarização do fóton?

Apenas em um dos anteparos temos a dispersão do fóton, aquele que tem a sua frente o polaróide 1, tem um ângulo de 0° . Assim observa-se que o fóton que sai da fonte está polarizada em 0° ou 180° , e passará apenas pelo polaróide a 0° , pois o fóton tem um movimento ondulatório, assim não passará pelo polaróide a 90° .

7) Vamos analisar a seguinte situação: cada fóton é detectado na tela como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

Se tem interferência, não há posição definida, logo no interferômetro não existe posição definida.

Colocando um dos polaróides em ângulo diferente de polarização da fonte.

Sugestão 3.

1) Coloque novamente o espelho semi-refletor 2 e inclua nesse novo arranjo os Filtros Polaróides 1 e 2, um em cada braço do experimento, com os **eixos cruzados** em 90° (um

deles em 0° e o outro em 90°), esta será uma maneira de sabermos por qual dos braços (caminho) passou cada fóton. Se o fóton passar por um dos braços apenas, terá necessariamente que emergir do interferômetro com sua polarização dada pelo eixo de polaróide que se encontra naquele braço, por isso devemos colocar o Filtro Polaróide 3 colocado entre o espelho semi-refletor 2 e ao anteparo. Tanto faz se o ângulo for de 0° ou 90° , pois o eixo de polarização será paralelo a um polaróide e ortogonal ao outro, de maneira que o fóton que chegar a tela terá passado pelo braço onde se encontrava o polaróide com eixo paralelo ao do terceiro polaróide. Façamos isso.

2) Gradue o polarizador 1 (Filtro Polaróide 1) em 0° ou em 360° , coloque o terceiro polaróide na saída do interferômetro e gradue seu ângulo de modo que seu eixo seja paralelo ao primeiro polaróide. Já o segundo gradue em 90° ou 270° , em seguida ligue a fonte em regime monofotônico, ou seja, opção Fótons Únicos, e espere até que se acumule um grande número de impactos. O que você observa?

Há uma dispersão do fóton na tela, pois o caminho percorrido para chegar à tela é apenas um, aquele onde o polaróide está em um ângulo de 0° , no polaróide 2 o ângulo é de 90° e o fóton não passa.

3) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo posição dentro do interferômetro? E quando não se observa esse padrão de interferência? Por quê?

Se há interferência, não há posição. Quando o fóton possui posição definida não haverá interferência.

4) Um argumento óbvio é que o fóton poderia ter se dividido em duas partes no primeiro separador de feixe, atravessado o aparelho e, de alguma forma, ter recombinado-se no segundo separador de feixe. Verifique se isso é verdade ou não.

Não, porque se acrescentar os detectores, veremos que suas luzes acendem alternadamente, o que significa que ele segue um ou outro caminho de cada vez, nunca os dois ao mesmo tempo.

5) Troque os dois polaróides 1 e 2 por dois detectores de fótons. Verifique através da luzinha que tem em cada detector se existe simultaneidade com a entrada de cada fóton individual no aparelho. O que você observa?

Que há uma entrada individual de cada fóton, pois se a luzinha acende em um não acende no outro.

de π rad, enquanto o outro a mudança é de $\pi/2$ rad, que corresponde a um avanço de $1/4$ de comprimento de onda da luz.

Onde ocorreu a destruição das fases / predomina a transmitida, aparece o “claro” e onde ocorre a construção das fases (ondas aparecem em fase) predomina a refletida. A fonte era inicialmente coerente, mas quando ela passa pelos espelhos ela acaba num ser coerente e no outro não tendo a coerência, fica destrutiva (não aparece).

5) Tente explicar esse fenômeno (o resultado obtido nesse experimento). A luz apresenta qual comportamento?

Ocorre o fenômeno da interferência da luz.

6) Agora, remova desse arranjo o espelho semi-refletor 2 e repita todo o processo. Tente explicar esse resultado.

Ocorre a dispersão tanto onde o laser é refletido + refletido (luz dispersa) como onde o laser é transmitido + refletido.

7) Você saberia dizer qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nestes dois casos, com e sem o segundo espelho semi-refletor, sabendo apenas que esse feixe de *laser* emitido pela fonte tem intensidade I_0 ?

A mesma intensidade da inicial.

8) Compare os dois experimentos, a que conclusões você chegou a respeito da luz?

No 1º experimento ocorre a interferência e no 2º experimento ocorre a dispersão.

Sugestão de outros guia experimental, agora usando polaróides

Sugestão 1.

1) Você saberia dizer o que acontecerá se apresentarmos os polaróides aos experimentos?

Podemos ver ou não as luzes conforme se os polaróides estão ou não abertas.

2) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com o espelho semi-refletor 2. Porém, agora vamos inserir em nosso experimento polaróides. Ative o primeiro polaróide (Filtro Polaróide 1) e ele aparecerá em um dos braços do interferômetro. Clicar na opção: Ligado. Qual o padrão observado nas telas (anteparos)?

Observa-se a dispersão em 90° e 270° , pois o laser reflete no 1º semi-refletor e após reflete novamente no espelho e no segundo semi-refletor ela reflete e transmite. Quando estão em 0° e 180° houve a passagem normal.

3) Agora mude o ângulo de seu polaróide para 90° e argumente o que observamos nas telas.

Houve o bloqueio no polaróide.

4) Analisando as perguntas 2 e 3, é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

É polarizado.

5) Com esse mesmo arranjo, acrescente um segundo polaróide (Filtro Polaróide 2), os dois com o ângulo em 90° , e ligue o experimento. O que aparece nos anteparos? Agora é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Nada, pois há o bloqueio total. Não houve dispersão e nem polarização. A fonte é polarizada.

Sugestão 2.

1) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com os dois polaróides em ângulos de 90° (Filtro Polaróide 1 e 2). Porém, agora vamos retirar o espelho semi-refletor 2 de nosso experimento, em seguida clicar na opção: Ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?

Nada. Pois continua o bloqueio total nos dois polaróides.

2) Agora mude os ângulos dos polaróides para 180° e argumente o que observamos nas telas.

Ocorre somente a dispersão.

3) Monte um guia experimental usando a fonte *laser* e os polaróides.

A) Continuamos com a mesma opção de fonte laser ligado e com os dois polaróides 1 e 2, respectivamente 180° e 90° , ao semi-refletor 2 ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?

Houve a dispersão pelo fato do polaróide 1 estar aberto, quer dizer, permite a transmissão de luz para o espelho e este reflete para o semi-refletor 2 que, por sua vez, reflete para um anteparo e transmite para o outro anteparo.

A luz mesmo sofrendo uma dispersão não deixa de ser polarizada em relação ao polaróide 2, pois este impede a passagem da luz.

Sugestão de guias experimentais, agora usando como fonte fótons únicos

Sugestão 1.

1) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que um fóton é emitido por vez. Ligue a fonte luminosa em regime

monofotônico clicando na opção Fótons Únicos. Observe o que aparece em cada um dos anteparos.

2) A partir do que se observa em cada um dos anteparos, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande, como se manifesta o comportamento ondulatório?

Se manifesta como partícula no início e na chegada do anteparo, aparecendo pontualmente e após chegada de um número muito grande de fótons de manifesta com interferência no anteparo.

3) Compare o padrão que vai se formando nos anteparos com o padrão que foi observado quando tínhamos como opção de fonte o *laser*.

Se formou o mesmo padrão do laser, pois ocorre a interferência.

4) Adicione o detector 1 (D1) ou o detector 2 (D2). Observe os números registrados no canto superior desta janela e repare que uma luzinha acende na fonte, sempre que um fóton é emitido, e quando o fóton passa pelo detector este também acende uma luzinha. Relacione a contagem de fótons no detector escolhido com os números de fótons que chegam aos anteparos. Compare o padrão observado nos anteparos com o padrão para *laser* sem o segundo espelho semi-refletor.

No detector é a metade da contagem dos fótons que saem da fonte, e noto que nos anteparos é aproximadamente $\frac{1}{4}$ dos fótons que chegam, com isto podemos concluir que o detector “destrói” todos fótons que chegam nele. Comparando com padrão laser observa-se que são semelhantes, uma é uma mancha por ser ondas e outra é pontual por ser fóton (partícula).

5) Ainda nesta situação proposta, qual o efeito do detector 1 ou do detector 2?

Cada detector “anula (destrói) aproximadamente 50% dos fótons.

6) Agora acrescente no outro braço deste aparato o detector 1 ou o detector 2, o que não foi usado na opção anterior. A fonte continua na opção Fótons Únicos. Clique em Ligado. Responda o que você observa nos contadores dos detectores (janela no lado superior) e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte e nas telas? Se você clicar na opção Acelerar, o que você observa nas contagens dos detectores?

As pequenas lâmpadas dos detectores acendem toda vez que chega um fóton e o destrói, sendo que em cada “contada” dos detectores aparecem 50% da contagem total da fonte. Nas telas não aparece nada, pois ocorre a destruição de 100% dos fótons nos detectores.

7) A que conclusões você chegou ao comparar os experimentos cuja fonte era *laser* com os experimentos cuja fonte era fótons únicos?

Comprovando os dois experimentos temos com o laser a dispersão e interferência e com os fótons temos dualidade da partícula, quer dizer, na saída e chegada se comporta como partícula e no meio como onda.

Sugestão 2.

1) Verifique se estão ativadas as opções do espelho semi-refletor e se os anteparos 1 e 2 estão presentes. Ative o primeiro polaróide em 0° (Filtro Polaróide 1) num dos braços do interferômetro. Ligue a fonte em Fótons Únicos e depois de esperar que um número muito grande de fótons saiam da fonte, qual o padrão que você observa nos anteparos?

Observa-se um comportamento ondulatório, pois vê-se interferência de forma pontual chegando em cada anteparo 50% dos fótons.

2) Repita o experimento mudando o ângulo deste polaróide para 90° , qual padrão você observa nos anteparos?

Perde-se o padrão de onda na tela, pois o filtro bloqueia a passagem dos fótons com isto, nos anteparos somente chegam os fótons (pontual).

3) Coloque, agora, o segundo polaróide (Filtro Polaróide 2) no outro braço, cujos ângulos devem ser de 90° . Após um número grande de impactos, o que você observa nas telas?

O número de impactos é muito grande, mas não aparece nada na tela, pois no caminho o fóton se comporta como onda assim ele é filtrado nos filtro polaróide.

4) Mude os ângulos para 0° . O que você observa nos anteparos (após um grande número de fótons emitidos)?

Observa-se que pelo comportamento ondulatório dos fótons no caminho, eles passam livremente pelos filtros e nas telas aparecem pontos com figuras que parecem ondas com interferência.

5) Conserve o ângulo 0° no Filtro Polaróide 2 e mude para 90° o ângulo do Filtro Polaróide 1. Novamente após ocorrido um grande número de impactos você pode concluir se a fonte é ou não polarizada?

Ela é polarizada em 0° e 180° , pois nestes casos sabemos por onde ela passa. Ocorre somente a passagem no filtro polaróide 2.

6) Com o mesmo arranjo da questão anterior, retire o segundo espelho semi-refletor e explique o padrão visto nos anteparos. Qual sua conclusão em relação à polarização do fóton?

O fóton esta se deslocando somente no caminho 2 e chegando no anteparo 1 com uma polarização de 0° ou 180° e não passa pelo filtro 1.

7) Vamos analisar a seguinte situação: cada fóton é detectado na tela como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

- Não é bem definido, pois não temos a posição e a interferência ao mesmo tempo. Quer dizer, quando temos a posição destruímos a interferência e quando temos a interferência destruímos a posição.

1º) Coloca-se os dois filtros em 0° , observa-se a interferência nos anteparos.

2º) Num filtro permanece em 0° e o outro em 90° , observa-se que não existe mais a interferência e sim a dispersão.

Concluiu-se que no momento que temos a dispersão (caminho definido) obstruímos a interferência.

Sugestão 3.

1) Coloque novamente o espelho semi-refletor 2 e inclua nesse novo arranjo os Filtros Polaróides 1 e 2, um em cada braço do experimento, com os **eixos cruzados** em 90° (um deles em 0° e o outro em 90°), esta será uma maneira de sabermos por qual dos braços (caminho) passou cada fóton. Se o fóton passar por um dos braços apenas, terá necessariamente que emergir do interferômetro com sua polarização dada pelo eixo de polaróide que se encontra naquele braço, por isso devemos colocar o Filtro Polaróide 3 colocado entre o espelho semi-refletor 2 e ao anteparo. Tanto faz se o ângulo for de 0° ou 90° , pois o eixo de polarização será paralelo a um polaróide e ortogonal ao outro, de maneira que o fóton que chegar a tela terá passado pelo braço onde se encontrava o polaróide com eixo paralelo ao do terceiro polaróide. Façamos isso.

2) Gradue o polarizador 1 (Filtro Polaróide 1) em 0° ou em 360° , coloque o terceiro polaróide na saída do interferômetro e gradue seu ângulo de modo que seu eixo seja paralelo ao primeiro polaróide. Já o segundo gradue em 90° ou 270° , em seguida ligue a fonte em regime monofotônico, ou seja, opção Fótons Únicos, e espere até que se acumule um grande número de impactos. O que você observa?

página pode estar “fora do ar” e para não prejudicarmos a nossa aula teremos essas outras opções.

- 1) Já com o programa aberto, observamos as barras e as ferramentas de que compõem esse *software*.
- 2) Identifique agora o caminho seguido pelos raios luminosos, que é ilustrado em uma animação de um feixe colimado se propagando. Clique em Ver Feixes.
- 3) Identifique os aparatos divisores de feixes (semi-espelhos ou espelhos semi-refletores). Justifique sua resposta.
- 4) Escolha para fonte a opção *Laser* e observe o que aparece nos anteparos. Explique o que você vê, lembrando que o feixe de luz refletido no espelho comum muda de fase por um fator de π rad, enquanto o outro a mudança é de $\pi/2$ rad, que corresponde a um avanço de $1/4$ de comprimento de onda da luz.
- 5) Tente explicar esse fenômeno (o resultado obtido nesse experimento). A luz apresenta qual comportamento?
- 6) Agora, remova desse arranjo o espelho semi-refletor 2 e repita todo o processo. Tente explicar esse resultado.
- 7) Você saberia dizer qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nestes dois casos, com e sem o segundo espelho semi-refletor, sabendo apenas que esse feixe de *laser* emitido pela fonte tem intensidade I_0 ?
- 8) Compare os dois experimentos. A que conclusões você chegou a respeito da luz?

Sugestão de outros guia experimental, agora usando polaróides

Sugestão 1.

- 1) Você saberia dizer o que acontecerá se apresentarmos os polaróides aos experimentos?
- 2) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com o espelho semi-refletor 2. Porém, agora vamos inserir em nosso experimento polaróides. Ative o primeiro polaróide (Filtro Polaróide 1) e ele aparecerá em um dos braços do interferômetro. Clicar na opção: Ligado. Qual o padrão observado nas telas (anteparos)?
- 3) Agora mude o ângulo de seu polaróide para 90° e argumente o que observamos nas telas.
- 4) Analisando as perguntas 2 e 3, é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

5) Com esse mesmo arranjo, acrescente um segundo polaróide (Filtro Polaróide 2), os dois com o ângulo em 90° , e ligue o experimento. O que aparece nos anteparos? Agora é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Sugestão 2.

1) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com os dois polaróides em ângulos de 90° (Filtro Polaróide 1 e 2). Porém, agora vamos retirar o espelho semi-refletor 2 de nosso experimento, em seguida clicar na opção: Ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?

2) Agora mude os ângulos dos polaróides para 180° e argumente o que observamos nas telas.

3) Monte um guia experimental usando a fonte *laser* e os polaróides.

Sugestão de guias experimentais, agora usando como fonte fótons únicos

Sugestão 1.

1) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que um fóton é emitido por vez. Ligue a fonte luminosa em regime monofotônico clicando na opção Fótons Únicos. Observe o que aparece em cada um dos anteparos.

2) A partir do que se observa em cada um dos anteparos, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande, como se manifesta o comportamento ondulatório?

Se manifesta como se fosse uma onda, formando uma dualidade. Ocorre interferência nos anteparos.

3) Compare o padrão que vai se formando nos anteparos com o padrão que foi observado quando tínhamos como opção de fonte o *laser*.

Mesmo padrão, pois ocorre a interferência.

4) Adicione o detector 1 (D1) ou o detector 2 (D2). Observe os números registrados no canto superior desta janela e repare que uma luzinha acende na fonte, sempre que um fóton é emitido, e quando o fóton passa pelo detector este também acende uma luzinha. Relacione a contagem de fótons no detector escolhido com os números de fótons que chegam aos

anteparos. Compare o padrão observado nos anteparos com o padrão para *laser* sem o segundo espelho semi-refletor.

Os fótons que saem do detector é a metade da contagem. Os fótons que saem da fonte enquanto que nos anteparos é aproximadamente 1/4 dos fótons que chegam, com isso pode concluir que o detector destrói todos os fótons que chegam a ele.

Com o padrão laser, são semelhantes, ocorrendo uma mancha por ser onda e outra é pontual por ser fóton.

5) Ainda nesta situação proposta, qual o efeito do detector 1 ou do detector 2?

Cada detector destrói 50% dos fótons, colocando D2 não haverá passagem deles.

6) Agora acrescente no outro braço deste aparato o detector 1 ou o detector 2, o que não foi usado na opção anterior. A fonte continua na opção Fótons Únicos. Clique em Ligado. Responda o que você observa nos contadores dos detectores (janela no lado superior) e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte e nas telas? Se você clicar na opção Acelerar, o que você observa nas contagens dos detectores?

Nas lâmpadas dos detectores acendem toda vez que chega um fóton e a destrói, na proporção de 50% para cada detector. Nas telas não aparece nada, pois os detectores destroem os fótons. A contagem dos detectores é de 50% para cada um.

7) A que conclusões você chegou ao comparar os experimentos cuja fonte era *laser* com os experimentos cuja fonte era fótons únicos?

Comparando os dois experimentos temos com o laser temos e dispersão e interferência e com os fótons temos a dualidade onda-partícula, quer dizer na saída e chegada se comporta como partícula e no meio como onda.

Sugestão 2.

1) Verifique se estão ativadas as opções do espelho semi-refletor e se os anteparos 1 e 2 estão presentes. Ative o primeiro polaróide em 0° (Filtro Polaróide 1) num dos braços do interferômetro. Ligue a fonte em Fótons Únicos e depois de esperar que um número muito grande de fótons saiam da fonte, qual o padrão que você observa nos anteparos?

Observa-se um comportamento ondulatório. O filtro interrompe a passagem dos fótons.

2) Repita o experimento mudando o ângulo deste polaróide para 90°. Qual padrão você observa nos anteparos?

Perde-se o padrão de onda na tela, pois o filtro bloqueia a passagem dos fótons, por isso nos anteparos somente aparecem fótons pontuais.

3) Coloque, agora, o segundo polaróide (Filtro Polaróide 2) no outro braço, cujos ângulos devem ser de 90° . Após um número grande de impactos, o que você observa nas telas?

O número de impactos é muito grande, mas não aparece nada na tela, pois o fóton se comporta como onda, assim ele é filtrado nos filtros polaróides.

4) Mude os ângulos para 0° . O que você observa nos anteparos (após um grande número de fótons emitidos)?

Comportamento ondulatório dos fótons no caminho, passam livremente pelos filtros.

5) Conserve o ângulo 0° no Filtro Polaróide 2 e mude para 90° o ângulo do Filtro Polaróide 1. Novamente após ocorrido um grande número de impactos você pode concluir se a fonte é ou não polarizada?

Ela é polarizada em 0° e 180° , neste caso sabe-se por onde passa, somente passa no polaróide a 0° ou 180° .

6) Com o mesmo arranjo da questão anterior, retire o segundo espelho semi-refletor e explique o padrão visto nos anteparos. Qual sua conclusão em relação à polarização do fóton?

O fóton é polarizado a 0° ou 180° . O fóton está se deslocando no anteparo 1, e não passa no filtro 1.

7) Vamos analisar a seguinte situação: cada fóton é detectado na tela como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

Não é bem definido, pois não temos a posição e interferência ao mesmo tempo. Quer dizer, quando temos a posição destruímos a interferência e quando temos interferência destruímos a posição.

Colocar os dois filtros em 0° , observa-se a interferência e em seguida colocar um filtro em 90° , observa-se que não existe mais a interferência e sim a dispersão, conclui-se que no momento que temos a dispersão destruímos a interferência.

Sugestão 3.

1) Coloque novamente o espelho semi-refletor 2 e inclua nesse novo arranjo os Filtros Polaróides 1 e 2, um em cada braço do experimento, com os **eixos cruzados** em 90° (um deles em 0° e o outro em 90°), esta será uma maneira de sabermos por qual dos braços

Sugestão de um guia experimental para o interferômetro virtual de Mach-Zehnder (IMZ)

Temos acesso livre ao *software* do interferômetro de Mach-Zehnder, com sua versão em três idiomas, no sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> ou se preferirmos podemos salvá-lo nos nossos microcomputadores ou mesmo em disquete, digo isso, pois eventualmente a página pode estar “fora do ar” e para não prejudicarmos a nossa aula teremos essas outras opções.

1) Já com o programa aberto, observamos as barras e as ferramentas de que compõem esse *software*.

2) Identifique agora o caminho seguido pelos raios luminosos, que é ilustrado em uma animação de um feixe colimado se propagando. Clique em Ver Feixes.

3) Identifique os aparatos divisores de feixes (semi-espelhos ou espelhos semi-refletores). Justifique sua resposta.

São espelhos semi-refletores porque ao mesmo tempo eles refletem e transmitem os raios.

4) Escolha para fonte a opção *laser* e observe o que aparece nos anteparos. Explique o que você vê, lembrando que o feixe de luz refletido no espelho comum muda de fase por um fator de π rad, enquanto o outro a mudança é de $\pi/2$ rad, que corresponde a um avanço de $1/4$ de comprimento de onda da luz.

Observamos que ocorre um padrão de referência que geram uma diferença de fase, sendo destrutiva no anteparo 2 e construtiva no anteparo 1.

5) Tente explicar esse fenômeno (o resultado obtido nesse experimento). A luz apresenta qual comportamento?

Ondulatório.

6) Agora, remova desse arranjo o espelho semi-refletor 2 e repita todo o processo. Tente explicar esse resultado.

Desaparecem as interferências, tanto as construtivas como as destrutivas quando o segundo espelho semi-refletor foi retirado, pois é ele que provocava defasagens e como consequência interferência.

7) Você saberia dizer qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nestes dois casos, com e sem o segundo espelho semi-refletor, sabendo apenas que esse feixe de *laser* emitido pela fonte tem intensidade I_0 ?

Com o segundo espelho no anteparo 1 a luz refletida tem a mesma intensidade que a luz emitida pela fonte e no anteparo 2 não há luminosidade.

8) Compare os dois experimentos, a que conclusões você chegou a respeito da luz?

Com o segundo espelho notamos que aconteceu o fenômeno da interferência e sem ele só acontece o cruzamento dos raios de luz sem a interferência.

Sugestão de outros guias experimentais, agora usando polaróides

Sugestão 1.

1) Você saberia dizer o que acontecerá se apresentarmos os polaróides aos experimentos?

Não altera em nada se colocarmos todos os polaróides com ângulo de 0° , mas à medida que alterarmos o ângulo do primeiro, este desfaz a interferência.

2) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com o espelho semi-refletor 2. Porém, agora vamos inserir em nosso experimento polaróides. Ative o primeiro polaróide (Filtro Polaróide 1) e ele aparecerá em um dos braços do interferômetro. Clicar na opção: Ligado. Qual o padrão observado nas telas (anteparos)?

Não houve alteração, continuou acontecendo a interferência.

3) Agora mude o ângulo de seu polaróide para 90° e argumente o que observamos nas telas.

A luz não passou para o espelho 2, pois ela somente seguiu o caminho do espelho 1, sendo dividida em dois feixes quando bate (interceptor) o semi-refletor e ocasionando nos dois anteparos um fenômeno que não seja.

4) Analisando as perguntas 2 e 3, é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

É polarizada.

5) Com esse mesmo arranjo, acrescente um segundo polaróide (Filtro Polaróide 2), os dois com o ângulo em 90° , e ligue o experimento. O que aparece nos anteparos? Agora é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Utilizando os dois polaróides (1 e 2) neste experimento com ângulo de 90° os dois feixes não passam pelos polaróides.

Sugestão 2.

1) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com os dois polaróides em ângulos de 90° (Filtro Polaróide 1 e 2). Porém, agora vamos retirar o espelho semi-refletor 2 de nosso

experimento, em seguida clicar na opção: Ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?

Com a retirada do segundo semi-espelho não acontece nada diferente, pois ele não influencia no fenômeno que ocorre antes, porque a luz é polarizada antes do semi-espelho 2.

2) Agora mude os ângulos dos polaróides para 180° e argumente o que observamos nas telas.

Mudando o ângulo dos polaróides (com ângulo de 180°) a luz passa por eles e incide diretamente nos anteparos.

3) Monte um guia experimental usando a fonte *laser* e os polaróides.

Sugestão de guias experimentais, agora usando como fonte fótons únicos

Sugestão 1.

1) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que um fóton é emitido por vez. Ligue a fonte luminosa em regime monofotônico clicando na opção Fótons Únicos. Observe o que aparece em cada um dos anteparos.

2) A partir do que se observa em cada um dos anteparos, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande, como se manifesta o comportamento ondulatório?

Cada fóton que é emitido chega até um dos anteparos, de cada vez, aparecendo nos dois intercaladamente como tempo, marcando pontos que formam um padrão de interferência em cada um dos anteparos. Ou seja, sai como partícula, chega ao anteparo como partícula, mas como ocorre interferência porque a partícula se comporta tanto como partícula e como onda, justificando o princípio da dualidade da luz.

3) Compare o padrão que vai se formando nos anteparos com o padrão que foi observado quando tínhamos como opção de fonte o *laser*.

Observamos que tanto para laser como para fótons únicos o comportamento do que se formou nos anteparos foi a interferência (destrutiva e construtiva).

4) Adicione o detector 1 (D1) ou o detector 2 (D2). Observe os números registrados no canto superior desta janela e repare que uma luzinha acende na fonte, sempre que um fóton é emitido, e quando o fóton passa pelo detector este também acende uma luzinha. Relacione a

contagem de fótons no detector escolhido com os números de fótons que chegam aos anteparos. Compare o padrão observado nos anteparos com o padrão para *laser* sem o segundo espelho semi-refletor.

A fonte emite uma certa quantidade de fótons, sendo que a metade praticamente passa pelo detector 1 e a outra metade passa pelo outro caminho que fica registrado nos anteparos 1 e 2. O detector quando é aceso o fóton passa por ele e quando não ele percorre o outro caminho.

5) Ainda nesta situação proposta, qual o efeito do detector 1 ou do detector 2?

Detectar quando o fóton passa por ele (quando aceso) e quando o fóton percorre o outro caminho a luz para de acender.

6) Agora acrescenta no outro braço deste aparato o detector 1 ou o detector 2, o que não foi usado na opção anterior. A fonte continua na opção Fótons Únicos. Clique em Ligado. Responda o que você observa nos contadores dos detectores (janela no lado superior) e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte e nas telas? Se você clicar na opção Acelerar, o que você observa nas contagens dos detectores?

Os fótons passam pelos detectores 1 e 2, mas não é registrado nada nos anteparos 1 e 2 porque sabemos o caminho que os fótons passam, sendo assim nada acontece.

7) A que conclusões você chegou ao comparar os experimentos cuja fonte era *laser* com os experimentos cuja fonte era fótons únicos?

Com a fonte laser ocorre a interferência e nos fótons únicos ao serem acrescentados os detectores este fenômeno não foi observado.

Sugestão 2.

1) Verifique se estão ativadas as opções do espelho semi-refletor e se os anteparos 1 e 2 estão presentes. Ative o primeiro polaróide em 0° (Filtro Polaróide 1) num dos braços do interferômetro. Ligue a fonte em Fótons Únicos e depois de esperar que um número muito grande de fótons saiam da fonte, qual o padrão que você observa nos anteparos?

O fenômeno da interferência (destrutiva e construtiva), um em cada anteparo.

2) Repita o experimento mudando o ângulo deste polaróide para 90° . Qual padrão você observa nos anteparos?

Mudando o ângulo de 0° para 90° os fótons aparecem nos dois anteparos sem formar interferência e sim apenas uma mancha em cada anteparo.

3) Coloque, agora, o segundo polaróide (Filtro Polaróide 2) no outro braço, cujos ângulos devem ser de 90° . Após um número grande de impactos, o que você observa nas telas?

Não foi observado nenhum fenômeno nos dois anteparos porque a luz está polarizada em 0° e 180° e a luz (os fótons) não passam.

4) Mude os ângulos para 0° . O que você observa nos anteparos (após um grande número de fótons emitidos)?

Após a alteração nos polaróides para o ângulo de 0° os fótons únicos conseguem passar pelos dois devido à sua polarização que é igual, ocasionando nos dois anteparos o fenômeno da interferência (destrutiva e construtiva, uma em cada anteparo).

5) Conserve o ângulo 0° no Filtro Polaróide 2 e mude para 90° o ângulo do Filtro Polaróide 1. Novamente após ocorrido um grande número de impactos você pode concluir se a fonte é ou não polarizada?

Observei que mesmo mudando somente 1 polaróide para o ângulo diferente da polarização dos fótons a luz passa somente por 1 filtro de polaróide ocasionando manchas nos dois anteparos, sem que ocorra a interferência.

6) Com o mesmo arranjo da questão anterior, retire o segundo espelho semi-refletor e explique o padrão visto nos anteparos. Qual sua conclusão em relação à polarização do fóton?

Sem o segundo espelho semi-refletor os fótons únicos são lançados somente num anteparo, pois este tipo de espelho é que faz a divisão - reflexão - de uma parte dos fótons, ocasionando num anteparo somente uma mancha sem interferência e no outro anteparo não acontece nada, ou seja, nenhum fóton é lançado.

7) Vamos analisar a seguinte situação: cada fóton é detectado na tela como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

No interferômetro o fóton possui a posição bem definida, pois sabemos e obtemos através desta prática o caminho percorrido pelos fótons-únicos. Acrescentando o terceiro polaróide ao sistema e o espelho semi-refletor 2 ocorre manchas nos dois anteparos, sem interferência, porque os fótons só percorrem o caminho dos filtros polaróides que possuem mesmo ângulo da fonte (fótons únicos) sem passar pelo filtro polaróide de 90° .

Sugestão 3.

1) Coloque novamente o espelho semi-refletor 2 e inclua nesse novo arranjo os Filtros Polaróides 1 e 2, um em cada braço do experimento, com os **eixos cruzados** em 90° (um deles em 0° e o outro em 90°), esta será uma maneira de sabermos por qual dos braços (caminho) passou cada fóton. Se o fóton passar por um dos braços apenas, terá necessariamente que emergir do interferômetro com sua polarização dada pelo eixo de polaróide que se encontra naquele braço, por isso devemos colocar o Filtro Polaróide 3 colocado entre o espelho semi-refletor 2 e ao anteparo. Tanto faz se o ângulo for de 0° ou 90° , pois o eixo de polarização será paralelo a um polaróide e ortogonal ao outro, de maneira que o fóton que chegar a tela terá passado pelo braço onde se encontrava o polaróide com eixo paralelo ao do terceiro polaróide. Façamos isso.

2) Gradue o polarizador 1 (Filtro Polaróide 1) em 0° ou em 360° , coloque o terceiro polaróide na saída do interferômetro e gradue seu ângulo de modo que seu eixo seja paralelo ao primeiro polaróide. Já o segundo gradue em 90° ou 270° , em seguida ligue a fonte em regime monofotônico, ou seja, opção Fótons Únicos, e espere até que se acumule um grande número de impactos. O que você observa?

Os fótons passam pelo filtro polaróide 1, refletem no espelho e no espelho semi-refletor se divide e registra nos anteparos manchas, sem o fenômeno da interferência porque os fótons não cruzam pelo filtro polaróide 2 que está a 90° (ângulo diferente dos fótons).

3) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo posição dentro do interferômetro? E quando não se observa esse padrão de interferência? Por quê?

Quando não observamos o fenômeno da interferência é porque os fótons únicos apenas cruzam por um caminho, ou seja pelo filtro polaróide 1 e logo após no polaróide 3.

4) Um argumento óbvio é que o fóton poderia ter se dividido em duas partes no primeiro separador de feixe, atravessado o aparelho e, de alguma forma, ter recombinado-se no segundo separador de feixe. Verifique se isso é verdade ou não.

Sim e foi explicado na questão anterior.

5) Troque os dois polaróides 1 e 2 por dois detectores de fótons. Verifique através da luzinha que tem em cada detector se existe simultaneidade com a entrada de cada fóton individual no aparelho. O que você observa?

Que sim, pois a luzinha do detector 1 pisca quando a do 2 fica desligada e vice-versa, intercalando-se nos 2 detectores.

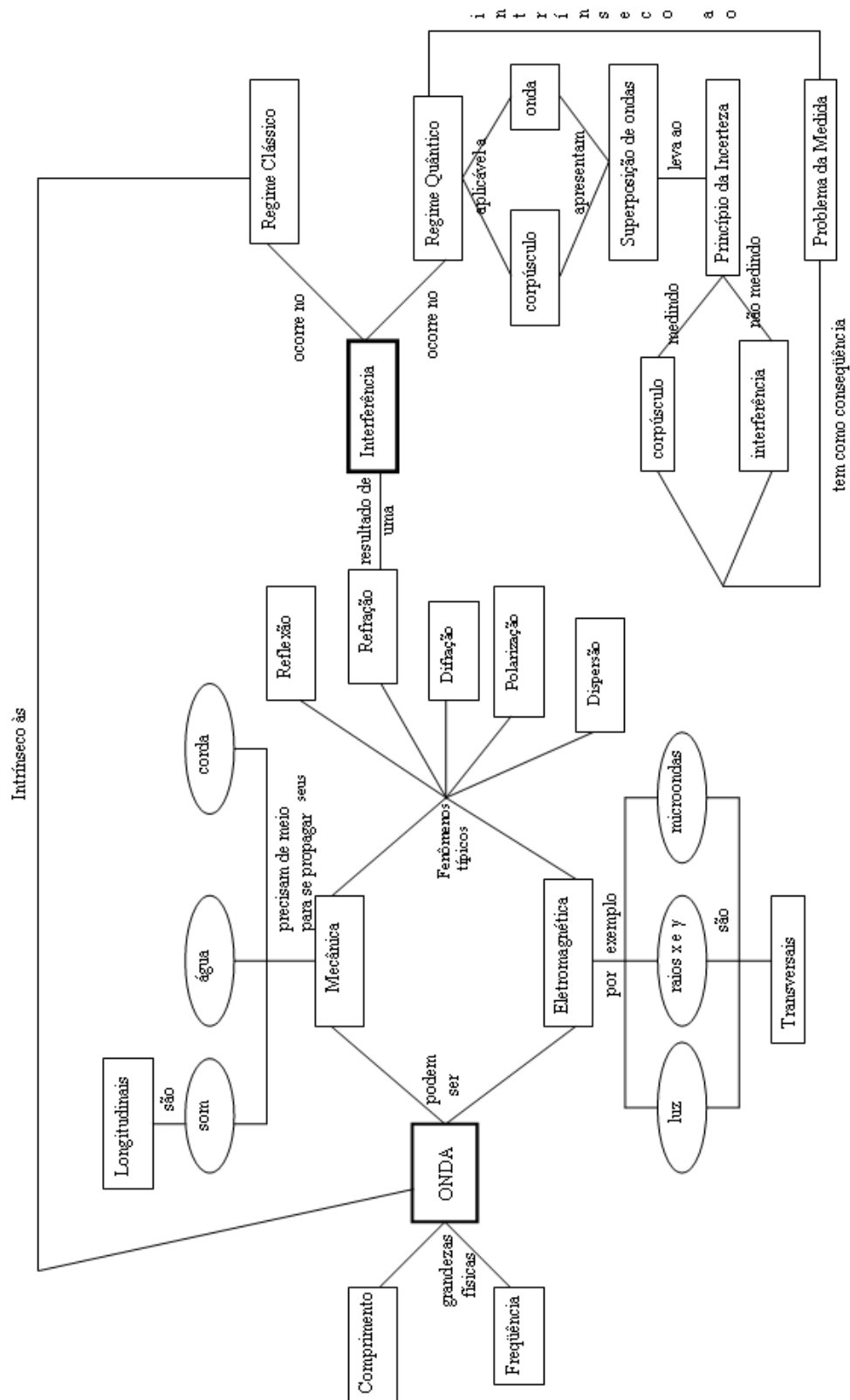
6) Com os dois espelhos semi-espelhos presentes no interferômetro e somente com os dois detectores de fótons, D3 e D4, colocados, respectivamente, sobre o eixo central das saídas 1 e 2 do aparelho, qual seria a probabilidade do fóton ser detectado por D3? E por D4?

A possibilidade de aparecer nos detectores é somente no detector que forma a onda (interferência construtiva), pois no outro onde a interferência é destrutiva a luzinha não acende, ou seja não é detectada.

7) O que você sugeriria para melhorar este *software*?

Devido a pouco conhecimento nesta área, prefiro não opinar em melhoramentos ou sugestões para este software, pois acredito que precisaria de mais estudo para tal feito.

APÊNDICE E – Mapa Conceitual sobre Ondas



ANEXOS

ANEXO A – Mapas conceituais e Aprendizagem significativa.

MAPAS CONCEITUAIS E APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA¹ (Concept maps and meaningful learning)

Marco Antonio Moreira
Instituto de Física - UFRGS
90501-970 Porto Alegre - RS, Brasil
www.i.ufrgs.br/~moreira

Resumo

Mapas conceituais são propostos como uma estratégia potencialmente facilitadora de uma aprendizagem significativa. Além disso, apresenta-se sua fundamentação teórica e são dados exemplos, particularmente na área de ciências.

Palavras-chave: mapas conceituais, aprendizagem significativa, ensino de ciências

Abstract

Concept maps are proposed as a strategy potentially useful to facilitate meaningful learning. In addition, its theoretical background is presented and some examples are given, specially in the area of sciences.

Keywords: concept maps, meaningful learning, science teaching.

O que são mapas conceituais

De um modo geral, mapas conceituais, ou mapas de conceitos, são apenas diagramas indicando relações entre conceitos, ou entre palavras que usamos para representar conceitos. As Figuras 1 e 2 mostram dois desses diagramas, um em “Ciências” e outro, mais específico, em Biologia.

Embora normalmente tenham uma organização hierárquica e, muitas vezes, incluam setas, tais diagramas não devem ser confundidos com organogramas ou diagramas de fluxo, pois não implicam seqüência, temporalidade ou direcionalidade, nem hierarquias organizacionais ou de poder. Mapas conceituais são diagramas de significados, de relações significativas; de hierarquias conceituais, se for o caso. Isso também os diferencia das redes semânticas que não necessariamente se organizam por níveis hierárquicos e não obrigatoriamente incluem apenas conceitos. Mapas conceituais também não devem ser confundidos com mapas mentais que são associacionistas, não se ocupam de relações entre conceitos, incluem coisas que não são conceitos e não estão organizados hierarquicamente. Não devem, igualmente, ser confundidos com quadros sinópticos que são diagramas

¹ Adaptado e atualizado, em 1997, de um trabalho com o mesmo título publicado em O ENSINO, Revista Galáico Portuguesa de Sócio-Pedagogia e Sócio-Linguística, Pontevedra/Galícia/Espanha e Braga/Portugal, N° 23 a 28: 87-95, 1988. Publicado também em *Cadernos do Aplicação*, 11(2): 143-156, 1998. Revisado e publicado em espanhol, em 2005, na *Revista Chilena de Educación Científica*, 4(2): 38-44.

classificatórios. Mapas conceituais não buscam classificar conceitos, mas sim relacioná-los e hierarquiza-los.

Muitas vezes utiliza-se figuras geométricas -- elipses, retângulos, círculos -- ao traçar mapas de conceitos, mas tais figuras são, em princípio, irrelevantes. É certo que o uso de figuras pode estar vinculado a determinadas regras como, por exemplo, a de que conceitos mais gerais, mais abrangentes, devem estar dentro de elipses e conceitos bem específicos dentro de retângulos. Em princípio, no entanto, figuras geométricas nada significam em um mapa conceitual. Assim como nada significam o comprimento e a forma das linhas ligando conceitos em um desses diagramas, a menos que estejam acopladas a certas regras. O fato de dois conceitos estarem unidos por uma linha é importante porque significa que há, no entendimento de quem fez o mapa, uma relação entre esses conceitos, mas o tamanho e a forma dessa linha são, *a priori*, arbitrários.

Mapas conceituais podem seguir um modelo hierárquico no qual conceitos mais inclusivos estão no topo da hierarquia (parte superior do mapa) e conceitos específicos, pouco abrangentes, estão na base (parte inferior). Mas esse é apenas um modelo, mapas conceituais não precisam necessariamente ter este tipo de hierarquia. Por outro lado, sempre deve ficar claro no mapa quais os conceitos contextualmente mais importantes e quais os secundários ou específicos. Setas podem ser utilizadas para dar um sentido de direção a determinadas relações conceituais, mas não obrigatoriamente.

Pode-se, então, definir certas diretrizes para traçar mapas conceituais como a regra das figuras, mencionada antes, ou a da organização hierárquica piramidal, mas são diretrizes contextuais, ou seja, válidas, por exemplo, para uma pesquisa ou para uma determinada situação de sala de aula. Não há regras gerais fixas para o traçado de mapas de conceitos. O importante é que o mapa seja um instrumento capaz de evidenciar significados atribuídos a conceitos e relações entre conceitos no contexto de um corpo de conhecimentos, de uma disciplina, de uma matéria de ensino. Por exemplo, se o indivíduo que faz um mapa, seja ele, digamos, professor ou aluno, une dois conceitos, através de uma linha, ele deve ser capaz de explicar o significado da relação que vê entre esses conceitos.

Uma ou duas palavras-chave escritas sobre essa linha (vide Figuras 1 e 2) podem ser suficientes para explicitar a natureza dessa relação. Os dois conceitos mais as palavras-chave formam uma proposição e esta evidencia o significado da relação conceitual. Por esta razão, o uso de palavras-chave sobre as linhas conectando conceitos é importante e deve ser incentivado na confecção de mapas conceituais, mas esse recurso não os torna auto-explicativos. Mapas conceituais devem ser explicados por quem os faz; ao explicá-lo, a pessoa externaliza significados. Reside aí o maior valor de um mapa conceitual. É claro que a externalização de significados pode ser obtida de outras maneiras, porém mapas conceituais são particularmente adequados para essa finalidade.

Como podem ser usados

O mapeamento conceitual é uma técnica muito flexível e em razão disso pode ser usado em diversas situações, para diferentes finalidades: instrumento de análise do currículo, técnica didática, recurso de aprendizagem, meio de avaliação (Moreira e Buchweitz, 1993).

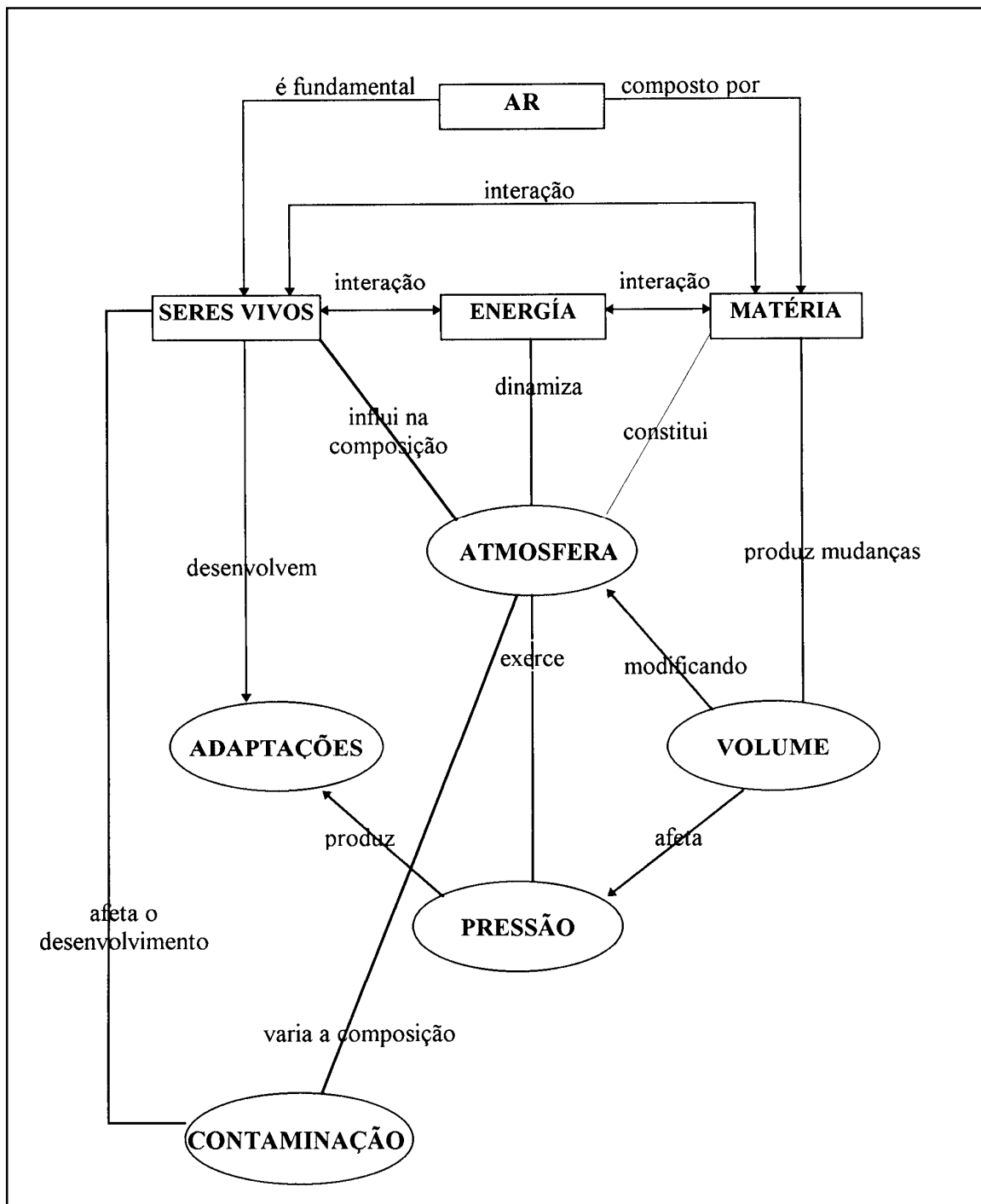


Figura 1: Mapa conceitual para o núcleo interdisciplinar de ciências do 1º ano, elaborado pelos professores Hugo Fernandez, Marta Ramirez e Ana Schnersch em uma oficina pedagogia sobre mapas conceituais realizado em Bariloche, Argentina, 1994.

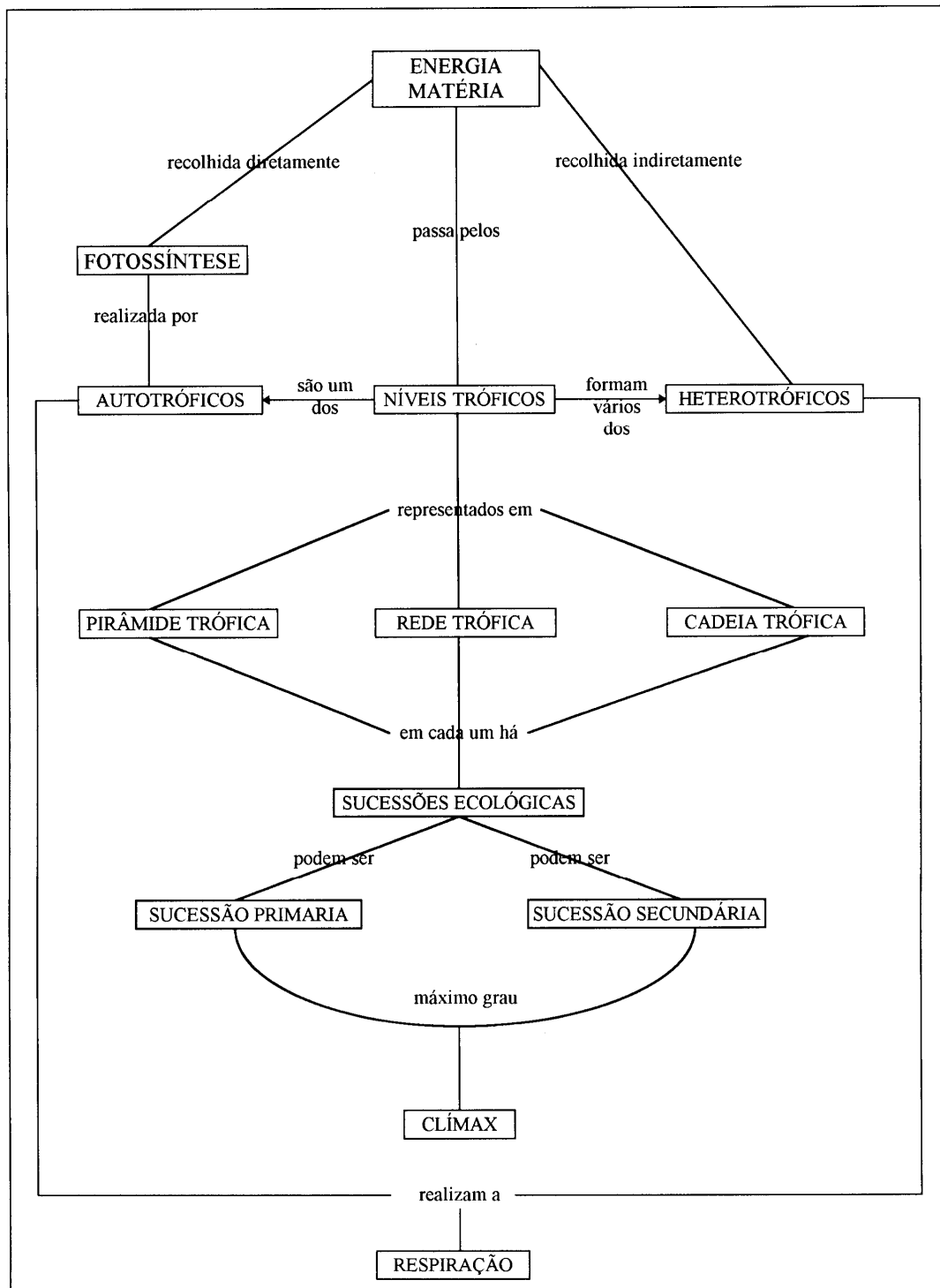


Figura 2: Mapa conceitual elaborado por um grupo de estudantes de 1º BUP (14/15 anos) para a dinâmica dos ecossistemas (Curso 1995/96). (Cedido por M^a Luz Rodríguez Palmero, I.B. Dr. Antonio González y González, Tejina, La Laguna, Sta. Cruz de Tenerife.)

É possível traçar um mapa conceitual para uma única aula, para uma unidade de estudo, para um curso ou, até mesmo, para um programa educacional completo. A diferença está no grau de generalidade e inclusividade dos conceitos colocados no mapa. Um mapa envolvendo apenas conceitos gerais, inclusivos e organizacionais pode ser usado como referencial para o planejamento de um curso inteiro, enquanto que um mapa incluindo somente conceitos específicos, pouco inclusivos, pode auxiliar na seleção de determinados materiais instrucionais. Isso quer dizer que mapas conceituais podem ser importantes mecanismos para focalizar a atenção do planejador de currículo na distinção entre o conteúdo curricular e conteúdo instrumental, ou seja, entre o conteúdo que se espera que seja aprendido e aquele que serve de veículo para a aprendizagem. O conteúdo curricular está contido em fontes de conhecimento tais como artigos de pesquisa, ensaios, poemas, livros. Mapas conceituais podem ser úteis na análise desses documentos a fim de tornar adequado para instrução o conhecimento neles contido. Considera-se aqui que o currículo se refere a um conjunto de conhecimentos. Sendo assim, a análise da estrutura do conhecimento implica a análise do currículo e o mapeamento conceitual pode ser um instrumento útil nessa análise.

De maneira análoga, mapas conceituais podem ser usados para mostrar relações significativas entre conceitos ensinados em uma única aula, em uma unidade de estudo ou em um curso inteiro. São representações concisas das estruturas conceituais que estão sendo ensinadas e, como tal, provavelmente facilitam a aprendizagem dessas estruturas. Entretanto, diferentemente de outros materiais didáticos, mapas conceituais não são auto-instrutivos: devem ser explicados pelo professor. Além disso, embora possam ser usados para dar uma visão geral do tema em estudo, é preferível usá-los quando os alunos já têm uma certa familiaridade com o assunto, de modo que sejam potencialmente significativos e permitam a integração, reconciliação e diferenciação de significados de conceitos (Moreira, 1980).

Na medida em que os alunos utilizarem mapas conceituais para integrar, reconciliar e diferenciar conceitos, na medida em que usarem essa técnica para analisar artigos, textos, capítulos de livros, romances, experimentos de laboratório, e outros materiais educativos do currículo, eles estarão usando o mapeamento conceitual como um recurso de aprendizagem.

Como instrumento de avaliação da aprendizagem, mapas conceituais podem ser usados para se obter uma visualização da organização conceitual que o aprendiz atribui a um dado conhecimento. Trata-se basicamente de uma técnica não tradicional de avaliação que busca informações sobre os significados e relações significativas entre conceitos-chave da matéria de ensino segundo o ponto de vista do aluno.

Fundamentação teórica

A teoria que está por trás do mapeamento conceitual é a teoria cognitiva de aprendizagem de David Ausubel (Ausubel et al., 1978, 1980, 1981, 2003; Moreira e Masini, 1982, 2006; Moreira, 1983, 1999, 2000). Trata-se, no entanto, de uma técnica desenvolvida em meados da década de setenta por Joseph Novak e seus colaboradores na Universidade de Cornell, nos Estados Unidos. Ausubel nunca falou de mapas conceituais em sua teoria.

O conceito básico da teoria de Ausubel é o de aprendizagem significativa. A aprendizagem é dita significativa quando uma nova informação (conceito, idéia, proposição) adquire significados para o aprendiz através de uma espécie de ancoragem em aspectos relevantes da estrutura cognitiva preexistente do indivíduo, isto é, em conceitos, idéias, proposições já existentes em sua estrutura de conhecimentos (ou de significados) com determinado grau de clareza, estabilidade e diferenciação. Esses aspectos relevantes da estrutura cognitiva que servem de ancoradouro para a nova informação são chamados “subsunçores”. O termo ancorar, no entanto, apesar de útil como uma primeira idéia do que é aprendizagem significativa não dá uma imagem da dinâmica do processo. Na aprendizagem significativa há uma interação entre o novo conhecimento e o já existente, na qual ambos se modificam. À medida que o conhecimento prévio serve de base para a atribuição de significados à nova informação, ele também se modifica, ou seja, os subsunçores vão adquirindo novos significados, se tornando mais diferenciados, mais estáveis. Novos subsunçores vão se formando; subsunçores vão interagindo entre si. A estrutura cognitiva está constantemente se reestruturando durante a aprendizagem significativa. O processo é dinâmico; o conhecimento vai sendo construído.

Na aprendizagem significativa o novo conhecimento nunca é internalizado de maneira literal, porque no momento em que passa a ter significado para o aprendiz entra em cena o componente idiossincrático da significação. Aprender significativamente implica atribuir significados e estes têm sempre componentes pessoais. Aprendizagem sem atribuição de significados pessoais, sem relação com o conhecimento preexistente, é mecânica, não significativa. Na aprendizagem mecânica, o novo conhecimento é armazenado de maneira arbitrária e literal na mente do indivíduo. O que não significa que esse conhecimento seja armazenado em um vácuo cognitivo, mas sim que ele não interage significativamente com a estrutura cognitiva preexistente, não adquire significados. Durante um certo período de tempo, a pessoa é inclusive capaz de reproduzir o que foi aprendido mecanicamente, mas não significa nada para ela.

No curso da aprendizagem significativa, os conceitos que interagem com o novo conhecimento e servem de base para a atribuição de novos significados vão também se modificando em função dessa interação, i.e., vão adquirindo novos significados e se diferenciando progressivamente. Imagine-se o conceito de “conservação”; sua aquisição diferenciada em ciências é progressiva: à medida que o aprendiz vai aprendendo significativamente o que é conservação da energia, conservação da carga elétrica, conservação da quantidade de movimento, o subsunçor “conservação” vai se tornando cada vez mais elaborado, mais diferenciado, mais capaz de servir de âncora para a atribuição de significados a novos conhecimentos. Este processo característico da dinâmica da estrutura cognitiva chama-se **diferenciação progressiva**.

Outro processo que ocorre no curso da aprendizagem significativa é o estabelecimento de relações entre idéias, conceitos, proposições já estabelecidos na estrutura cognitiva, i.e., relações entre subsunçores. Elementos existentes na estrutura cognitiva com determinado grau de clareza, estabilidade e diferenciação são percebidos como relacionados, adquirem novos significados e levam a uma reorganização da estrutura cognitiva. É o que ocorreria, por exemplo, se o aluno tivesse conceitos de campo elétrico e magnético claros e estáveis na estrutura cognitiva, os percebesse intimamente relacionados e reorganizasse seus significados de modo a vê-los como manifestações de um conceito mais abrangente, o de campo

eletromagnético. Essa recombinação de elementos, essa reorganização cognitiva, esse tipo de relação significativa, é referido como **reconciliação integrativa**.

A reconciliação integrativa e a diferenciação progressiva são dois processos relacionados que ocorrem no curso da aprendizagem significativa. Toda aprendizagem que resultar em reconciliação integrativa resultará também em diferenciação progressiva adicional de conceitos e proposições. A reconciliação integrativa é uma forma de diferenciação progressiva da estrutura cognitiva. É um processo cujo resultado é o explícito delineamento de diferenças e similaridades entre idéias relacionadas.

Mapas conceituais foram desenvolvidos para promover a aprendizagem significativa. A análise do currículo e o ensino sob uma abordagem ausubeliana, em termos de significados, implicam: 1) identificar a estrutura de significados aceita no contexto da matéria de ensino; 2) identificar os subsunçores (significados) necessários para a aprendizagem significativa da matéria de ensino; 3) identificar os significados preexistentes na estrutura cognitiva do aprendiz; 4) organizar seqüencialmente o conteúdo e selecionar materiais curriculares, usando as idéias de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa como princípios programáticos; 5) ensinar usando organizadores prévios, para fazer pontes entre os significados que o aluno já tem e os que ele precisaria ter para aprender significativamente a matéria de ensino, bem como para o estabelecimento de relações explícitas entre o novo conhecimento e aquele já existente e adequado para dar significados aos novos materiais de aprendizagem.

Mapas conceituais podem ser utilizados como recursos em todas essas etapas, assim como na obtenção de evidências de aprendizagem significativa, ou seja, na avaliação da aprendizagem. A Figura 3 apresenta um mapa conceitual sobre alguns conceitos básicos da teoria de Ausubel, tanto para estruturar o que foi dito nesta seção como para prover outro exemplo de mapa conceitual.

Mapas conceituais e aprendizagem significativa

Como a aprendizagem significativa implica, necessariamente, atribuição de significados idiossincráticos, mapas conceituais, traçados por professores e alunos, refletirão tais significados. Quer dizer, tanto mapas usados por professores como recurso didático como mapas feitos por alunos em uma avaliação têm componentes idiossincráticos. Isso significa que não existe mapa conceitual “correto”. Um professor nunca deve apresentar aos alunos o mapa conceitual de um certo conteúdo e sim um mapa conceitual para esse conteúdo segundo os significados que ele atribui aos conceitos e às relações significativas entre eles. De maneira análoga, nunca se deve esperar que o aluno apresente na avaliação o mapa conceitual “correto” de um certo conteúdo. Isso não existe. O que o aluno apresenta é o seu mapa e o importante não é se esse mapa está certo ou não, mas sim se ele dá evidências de que o aluno está aprendendo significativamente o conteúdo.

Naturalmente, o professor ao ensinar tem a intenção de fazer com que o aluno adquira certos significados que são aceitos no contexto da matéria de ensino, que são compartilhados por certa comunidade de usuários. O ensino busca fazer com que o aluno venha também a compartilhar tais significados. Mapas de conceitos podem ser valiosos na consecução desse objetivo e podem fornecer informação sobre como está sendo alcançado. Todavia, mapas conceituais -- tanto do aluno como do professor -- têm significados pessoais. Basta pedir a

dois professores, com igual conhecimento, que traçam um mapa de conceitos para certo conteúdo: seus mapas terão semelhanças e diferenças. Os dois mapas poderão evidenciar bom entendimento da matéria sem que se possa dizer que um é melhor do que outro e muito menos que um é certo e outro errado. O mesmo é válido em relação a mapas conceituais traçados por dois alunos na avaliação da aprendizagem de um mesmo conteúdo. Contudo, é preciso cuidado para não cair em um relativismo onde “tudo vale”: alguns mapas são definitivamente pobres e sugerem falta de compreensão.

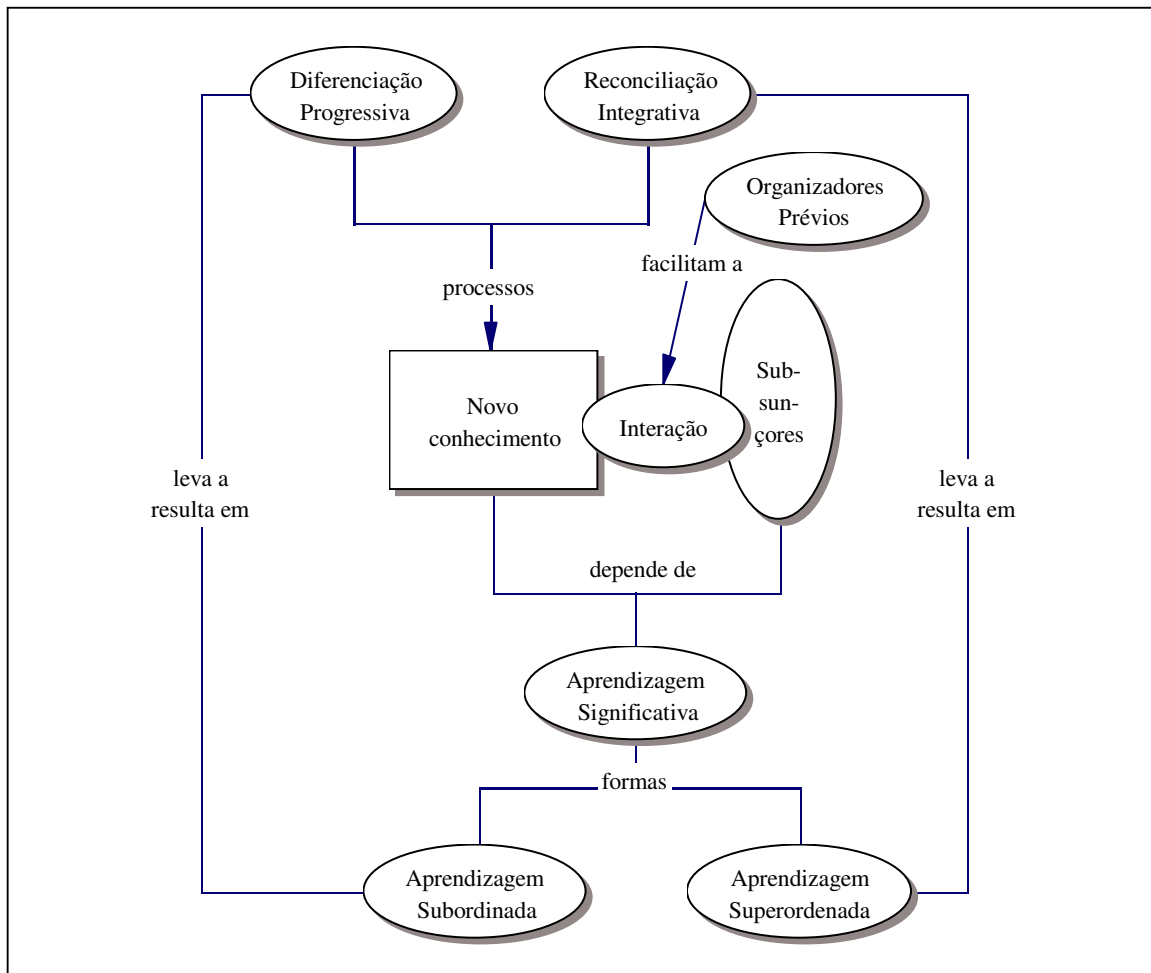


Figura 3: Alguns conceitos básicos da teoria de Ausubel (Moreira e Buchweitz, 1993)

No momento em que um professor apresentar para o aluno um mapa conceitual como sendo o mapa correto de um certo conteúdo, ou no momento em que ele exigir do aluno um mapa correto, estará promovendo (como muitos outros recursos instrucionais) a aprendizagem mecânica em detrimento da significativa. Mapas conceituais são dinâmicos, estão constantemente mudando no curso da aprendizagem significativa. Se a aprendizagem é significativa, a estrutura cognitiva está constantemente se reorganizando por diferenciação progressiva e reconciliação integrativa e, em consequência, mapas traçados hoje serão diferentes amanhã.

De tudo isso, depreende-se facilmente que mapas conceituais são instrumentos diferentes e que não faz muito sentido querer avaliá-los como se avalia um teste de escolha

múltipla ou um problema numérico. A análise de mapas conceituais é essencialmente qualitativa. O professor, ao invés de preocupar-se em atribuir um escore ao mapa traçado pelo aluno, deve procurar interpretar a informação dada pelo aluno no mapa a fim de obter evidências de aprendizagem significativa. Explicações do aluno, orais ou escritas, em relação a seu mapa facilitam muito a tarefa do professor nesse sentido.

Seguramente, tudo o que foi dito até aqui sobre mapas conceituais pode dar idéia de que é um recurso instrucional de pouca utilidade porque é muito pessoal e difícil avaliar (quantificar). De fato, de um ponto de vista convencional, mapas conceituais podem não ser muito atraentes nem para professores, que podem preferir a segurança de ensinar conteúdos sem muita margem para interpretações pessoais, nem para alunos habituados a memorizar conteúdos para reproduzi-los nas avaliações. No ensino convencional não há muito lugar para a externalização de significados, para a aprendizagem significativa. Mapas conceituais apontam em outra direção, requerem outro enfoque ao ensino e à aprendizagem.

Conclusão

Aparentemente simples e às vezes confundidos com esquemas ou diagramas organizacionais, mapas conceituais são instrumentos que podem levar a profundas modificações na maneira de ensinar, de avaliar e de aprender. Procuram promover a aprendizagem significativa e entram em choque com técnicas voltadas para aprendizagem mecânica. Utilizá-los em toda sua potencialidade implica atribuir novos significados aos conceitos de ensino, aprendizagem e avaliação. Por isso mesmo, apesar de se encontrar trabalhos na literatura ainda nos anos setenta, até hoje o uso de mapas conceituais não se incorporou à rotina das salas de aula.

Mas há relatos de estudos com mapas conceituais nas mais diversas áreas e em todos os níveis de escolaridade (Novak e Gowin, 1996). A Figura 4 é um mapa na área da literatura tirado de um estudo nessa área (M. Moreira, 1988) para corroborar esta afirmativa. Para concluir, provendo ao leitor mais um exemplo de mapa conceitual, a Figura 5 mostra um mapa na área de epistemologia.

Apêndice

No apêndice apresenta-se um breve guia experimental que poderá ser útil na construção de mapas conceituais. Este guia experimental não deve ser considerado uma “receita” para fazer mapas conceituais.

Referências

Ausubel, D.P., Novak, J.D. and Hanesian, H. (1978). *Educational psychology*. New York: Holt, Rinehart and Winston. Publicado em português pela Editora Interamericana, Rio de Janeiro, 1980. Em espanhol por Editorial Trillas, México, 1981. Reimpresso em inglês por Werbel & Peck, New York, 1986.

Ausubel, D.P. (2003). *Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas. Tradução de *The acquisition and retention of knowledge: a cognitive view*. (2000). Kluwer Academic Publishers.

Gobara, S.T. e Moreira, M.A. (1986). Mapas conceituais no ensino de Física. *Ciência e Cultura*, 38(6): 973-982.

Moreira, M.A. (1980). Mapas conceituais como instrumentos para promover a diferenciação conceitual progressiva e a reconciliação integrativa. *Ciência e Cultura*, 32(4): 474-479.

Moreira, M.A. (1983). *Uma abordagem cognitivista no ensino da Física*. Porto Alegre: Editora de Universidade.

Moreira, M.A. e Buchweitz, B. (1993). *Novas estratégias de ensino e aprendizagem: os mapas conceituais e o Vê epistemológico*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas.

Moreira, M.A. e Masini, E.F.S. (1982) *Aprendizagem significativa: a teoria de aprendizagem de David Ausubel*. São Paulo: Editora Moraes.

Moreira, M.A. e Masini, E.F.S. (2006) *Aprendizagem significativa: a teoria de aprendizagem de David Ausubel*. São Paulo: Centauro Editora.

Moreira, M.A. (2000). *Aprendizaje significativo: teoría y práctica*. Madrid: Visor.

Moreira, M.A. (1999). *Aprendizagem significativa*. Brasília: Editora da UnB.

Moreira, M.M. (1988) The use of concept maps and the five questions in a foreign language classroom: effects on interaction. Tese de doutorado. Ithaca, NY, Cornell University.

Novak, J.D. Gowin, D.B. (1996) *Aprender a aprender*. Lisboa: Plátano Edições Técnicas. Tradução de Learning how to learn (1984). Ithaca, N.Y.: Cornell University Press.

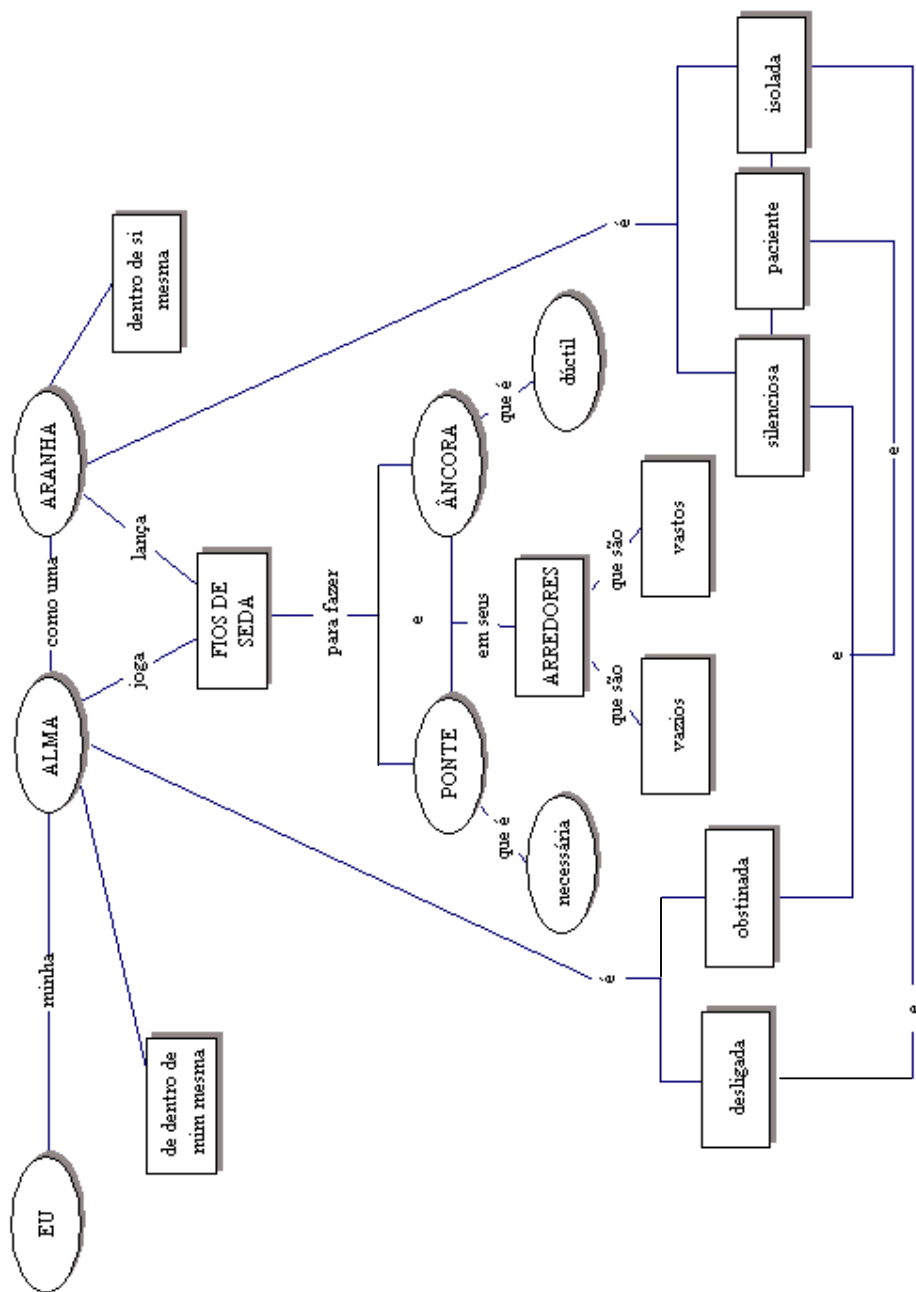


Figura 4: Um mapa conceitual para o poema "Uma aranha silenciosa e paciente", de Walt Whitman, em uma aula de literatura americana (M.M. Moreira, 1988)

Apêndice²

Como construir um mapa conceitual

1. Identifique os conceitos-chave do conteúdo que vai mapear e ponha-os em uma lista. Limite entre 6 e 10 o número de conceitos.
2. Ordene os conceitos, colocando o(s) mais geral(is), mais inclusivo(s), no topo do mapa e, gradualmente, vá agregando os demais até completar o diagrama de acordo com o princípio da diferenciação progressiva. Algumas vezes é difícil identificar os conceitos mais gerais, mais inclusivos; nesse caso é útil analisar o contexto no qual os conceitos estão sendo considerados ou ter uma idéia da situação em que tais conceitos devem ser ordenados.
3. Se o mapa se refere, por exemplo, a um parágrafo de um texto, o número de conceitos fica limitado pelo próprio parágrafo. Se o mapa incorpora também o seu conhecimento sobre o assunto, além do contido no texto, conceitos mais específicos podem ser incluídos no mapa.
4. Conecte os conceitos com linhas e rotule essas linhas com uma ou mais palavras-chave que explicitem a relação entre os conceitos. Os conceitos e as palavras-chave devem sugerir uma proposição que expresse o significado da relação.
5. Setas podem ser usadas quando se quer dar um sentido a uma relação. No entanto, o uso de muitas setas acaba por transformar o mapa conceitual em um diagrama de fluxo.
6. Evite palavras que apenas indiquem relações triviais entre os conceitos. Busque relações horizontais e cruzadas.
7. Exemplos podem ser agregados ao mapa, embaixo dos conceitos correspondentes. Em geral, os exemplos ficam na parte inferior do mapa.
8. Geralmente, o primeiro intento de mapa tem simetria pobre e alguns conceitos ou grupos de conceitos acabam mal situados em relação a outros que estão mais relacionados. Nesse caso, é útil reconstruir o mapa.
9. Talvez neste ponto você já comece a imaginar outras maneiras de fazer o mapa, outros modos de hierarquizar os conceitos. Lembre-se que não há um único modo de traçar um mapa conceitual. À medida que muda sua compreensão sobre as relações entre os conceitos, ou à medida que você aprende, seu mapa também muda. Um mapa conceitual é um instrumento dinâmico, refletindo a compreensão de quem o faz no momento em que o faz.
10. Compartilhe seu mapa com colegas e examine os mapas deles. Pergunte o que significam as relações, questione a localização de certos conceitos, a inclusão de alguns que não lhe parecem importantes, a omissão de outros que você julga fundamentais. O mapa conceitual é um bom instrumento para compartilhar, trocar e “negociar” significados.

² Há aplicativos especialmente desenhados para a construção de mapas conceituais. O mais conhecido deles é o Cmap: <http://cmap.ihmc.us>

ANEXO B – Questionários.

1-Questionário para conhecer o professor e suas condições de ensino

1- Nome:

2- Nome do(s) município(s) em que trabalha.

3- Assinale com um X o nível de instrução de mais alto grau que você já completou, escrevendo também o nome da instituição onde este foi obtido.

Ensino Superior , Licenciatura Curta – Instituição:

Ensino Superior , Licenciatura Plena – Instituição:

Pós graduação, especialização – Instituição:

Pós-graduação, mestrado e/ou doutorado– Instituição:

Graduação em andamento – Instituição:

4- Em que ano obteve este grau de formação?

5- Qual(is) o(s) curso(s) de graduação já concluído(s)?

Física Pedagogia Matemática

Química Biologia Outra. Qual? _____

6- Qual(is) a(s) escola(s) em que leciona? Qual(is) disciplina(s)? E a(s) séries?

7- Qual a sua carga horária semanal (em sala de aula)?

8- Tens horas semanais para planejamento, quantas?

9- Há quantos anos você leciona Física?

10- A(s) escola(s) onde você leciona Física possui laboratório de física em condições de uso?

11- A(s) escola(s) onde você leciona Física possui laboratório de informática?

12- Quantos microcomputadores sua escola possui no laboratório de informática?

Quantos desses têm acesso à *internet*?

13- E você tem computador em sua casa? Se sim, tens *internet*?

14- Você adota um livro didático com seus alunos, na disciplina de Física? Se sim, diga a razão de tê-lo adotado.

15- Quais os livros que você utiliza para o planejamento de suas aulas? Coloque em ordem crescente quanto a sua preferência.

16- Se você utiliza outros materiais para o planejamento de suas aulas, quais são eles?

17- Você trabalha com seus alunos do ensino médio algum tema de física quântica?

Em caso afirmativo, quais? Se não trabalha, qual(is) o(s) motivo(s)?

2-Questionário sobre noções básicas de física quântica

Q1. Você estudou física quântica no ensino superior? Em caso afirmativo, qual(is) a(s) disciplina(s) cursada(s)? Que livros você leu e/ou estudou?

Q2. Seus alunos de Ensino Médio costumam lhe fazer perguntas sobre física quântica? Em caso afirmativo, o que eles querem saber?

Q3. Você já leu, por interesse próprio, algum livro sobre temas da Física Moderna? Em caso afirmativo, qual(is)?

Q4. Se você pudesse apontar um “experimento” (real ou imaginário) significativo da física quântica, qual você indicaria?

Q5. Você já ouviu falar em função de onda no contexto da física quântica? Em caso afirmativo, o que ela significa para você?

Q6. As grandes teorias da Física são formalizadas em termos de um determinado número de postulados ou leis fundamentais. Por exemplo, na relatividade restrita temos dois postulados a partir dos quais uma série de conseqüências, previsões teóricas, concepções de experimentos, aplicações são obtidos. Ou na mecânica clássica, baseada em 3 leis do movimento. Você saberia enunciar algum(ns) *postulado(s)* da física quântica?

Q7. A figura é uma vista superior do aparato usado pelo médico Thomas Young - em 1801 - para realizar seu famoso *experimento da fenda dupla* com a luz. S_0 é uma pequena fenda simples em um anteparo, e S_1 e S_2 constituem uma fenda dupla, sobre um segundo anteparo, situado entre o primeiro e a tela. (i) O que foi observado por ele na tela que comprovava fortemente a teoria *ondulatória* da luz? (ii) Qual a finalidade do anteparo com a dupla fenda? (iii) Qual a finalidade do anteparo com apenas uma fenda? (iv) Que fenômenos ondulatórios “estão por trás” do resultado observado na tela?

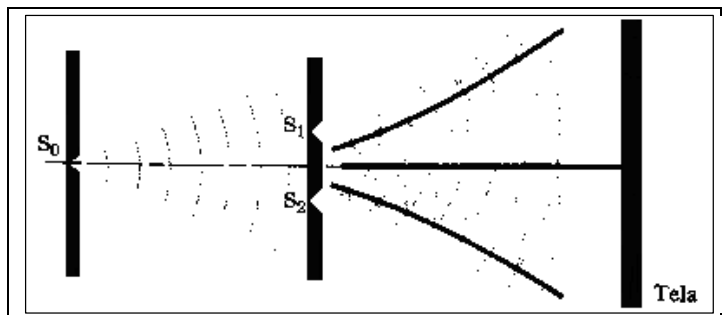


Figura 1- Experimento da Dupla Fenda

Q8. A partir do experimento de Young e de outros que se seguiram na primeira metade do século XIX, a idéia de que a luz é algum tipo de onda foi se firmando. Durante a segunda metade desse século, acreditou-se cada vez mais e foi comprovado, sistematicamente, a partir do trabalho experimental de Hertz (1887), que a luz pode ser considerada uma *onda eletromagnética*. No entanto, a partir do trabalho de Einstein sobre o efeito fotoelétrico (1905), começou a vingar uma renovada *teoria corpuscular*, que considerava agora a luz como sendo formada por “corpúsculos”, denominados, mais tarde, *fótons*. Considere novamente o experimento da fenda dupla. (i) Se ele fosse realizado com um feixe luminoso monocromático tão fraco que apenas um *único fóton* incidisse no anteparo de cada vez (*feixe monofotônico*), o que você acha que seria observado na tela após algum tempo decorrido?

Q9. Suponha agora que realizássemos o experimento da fenda dupla com um *feixe de elétrons* substituindo o feixe luminoso (e que retirássemos o anteparo de fenda única do aparato da figura 1). Suponha também que a superfície da tela tenha sido pintada com um material sensível ao elétron, cujo impacto produz um pequeno ponto na tela. O que você acha que seria observado?

Q10. Na questão anterior, o que você acha que seria observado na tela se o feixe luminoso monocromático fosse substituído por um feixe mono-energético de *elétrons* (todos de mesma energia), tão pouco intenso que apenas um *único elétron* incidisse no anteparo de fenda dupla? (OBS: Considere novamente que o anteparo de fenda única tenha sido retirado, e que a tela tenha sido pintada com material sensível aos impactos de elétrons.)

Q11. Costuma-se considerar elétrons, prótons, nêutrons e outros objetos microscópicos como partículas. (i) Em sua opinião, quais são as propriedades *corpusculares* características e

essenciais desses objetos? (ii) De que maneira essas propriedades se manifestam no mundo real?

Q12. Você diria que os objetos microscópicos mencionados na questão anterior poderiam também exibir, sob certas circunstâncias, propriedades tipicamente *ondulatórias*? De que maneira você acha que tais propriedades se manifestam no mundo real?

Q13. Livros didáticos freqüentemente mostram várias representações do átomo. Você já deve ter visto isso. Qual (ou quais) dessas representações se mantêm “vivas” em sua mente? Você a(s) considera “correta(s)”? O que significa para você a palavra “correta” neste contexto?

Q14. Comente a seguinte afirmativa: “*A Física Clássica (mecânica newtoniana + eletromagnetismo de Maxwell) é incapaz de explicar a estabilidade atômica*”.

Q15. A *mecânica quântica*, de Schrödinger, Heisenberg, Dirac e outros, trouxe novas idéias sobre o mundo microscópico. Em particular, permitiu uma melhor compreensão da noção conhecida como *dualidade onda-partícula*, originada dos trabalhos pioneiros de De Broglie, Compton e outros na década de 1920. (i) Qual seria sua versão pessoal do enunciado da dualidade-partícula? (ii) Qual a relação famosa que expressa matematicamente a dualidade onda-partícula? (iii) Cite um exemplo de experimento capaz de servir como comprovação da dualidade onda-partícula. (*Adaptado de questão do Exame Nacional de Cursos 2000.*)

MATERIAL DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

Texto de apoio ao professor de Física I.

Difração, Polarização e Interferência: Fenômenos Ondulatórios da Luz

1. Introdução

Somos todos fascinados pela luz, não sem razão, principalmente porque sem luz, não haveria vida na Terra. Ela não é somente um fenômeno físico dos mais belos para os nossos olhos, mas nossos olhos são órgãos apropriadamente adaptados à detecção de ondas eletromagnéticas, na região do espectro visível, ou seja, da luz. A luz é uma onda eletromagnética, assim como microondas, ondas de rádio, raios-X, que se propaga no vácuo com uma velocidade de aproximadamente $3 \cdot 10^8$ m/s tendo uma frequência característica de alguns 10^{14} Hz e comprimentos de onda (distância entre duas cristas da onda) de décimos de micrometros. Sendo uma onda eletromagnética, a luz é uma onda transversal o que significa que a propagação da mesma se dá na direção perpendicular às oscilações dos campos elétrico e magnético que a compõem.

A luz é uma onda que transporta energia, mas pode também empurrar objetos. Einstein propôs que ela tem momentum linear, muito embora não tenha massa. Se mostra em diferentes cores, em diferentes tons e também em diferentes nuances. Newton acreditava que ela era composta por pequeníssimos corpúsculos que ao colidirem com nossa retina, depositavam energia nos nossos olhos formando a imagem do objeto visto. Na hipótese newtoniana, a luz anda em linha reta e percorre a menor distância possível entre dois pontos no espaço. Por outro lado, Thomas Young realizou experiências cujos resultados só poderiam ser entendidos com uma teoria ondulatória da luz. Nessa teoria, a mesma contorna obstáculos de forma que sombras poderiam, sob certas circunstâncias, ser banhadas por luz. Mais tarde, no final do século XIX, Maxwell mostrou que ela não somente era uma onda, mas de fato, uma onda eletromagnética, o que reforça as teorias ondulatórias da luz. Então veio Planck com os *quanta* de luz, a idéia de que é composta por pequenos pacotes de energia, o *quantum*. Por fim, para explicar o efeito fotoelétrico, em 1905, Einstein teoriza que a luz ora se

comporta como onda e ora como composta pelos corpúsculos de Planck, propondo assim, um caráter dual para sua natureza, hipótese que sobrevive até nossos dias.

As ondas eletromagnéticas, assim como todas as ondas, estão também sujeitas a todos os fenômenos ondulatórios como reflexão, refração, difração e efeito Doppler, por exemplo. A polarização por sua vez, ocorre somente nas ondas transversais e nesse particular, a luz também se difere do som. O som é uma onda mecânica, pois precisa de um meio para se propagar é longitudinal, pois há oscilações das partículas do meio no qual o som se propaga, também no sentido de sua propagação. Para exemplificar a propagação do som, vamos usar um exemplo prático de grande utilidade para a saúde pública – as barreiras acústicas.

As ondas sonoras são ondas cujos comprimentos de onda típicos no ar variam de alguns poucos centímetros a algumas dezenas de metros. Uma solução para a diminuição do barulho nos bairros ou vilas próximas a grandes rodovias é a construção de muros relativamente espessos e altos (de 3 a 5m) margeando as rodovias. Esse recurso já é usado em várias partes dos Estados Unidos e está sendo adotado também em partes da Rodovia dos Bandeirantes no Estado de São Paulo. O muro deve ser espesso e feito com materiais apropriados para absorverem parte do som que nele incide e também alto para funcionar como uma barreira de som e formar uma zona de silêncio nas vizinhanças atrás do muro. Ainda assim, por causa da difração do som, ondas de comprimentos de onda grandes (baixa frequência) acabam sendo difratadas entrando na região que se não fosse a difração, seria a região de *sombra sonora*¹.

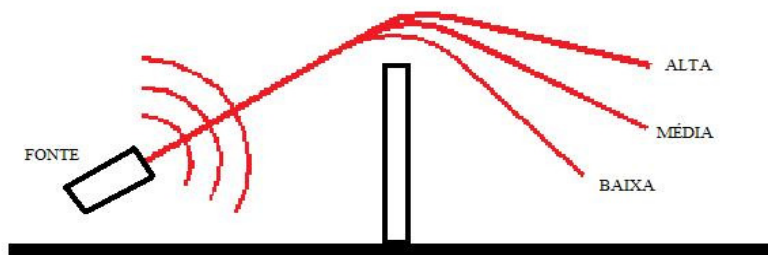


Figura 1- Variação de difração sobre barreira a diferentes frequências. Ilustração adaptada de http://www.arch-tec.com.br/Acustica_Arquitetonica_tx_compl.html (último acesso em 24/01/2010)

¹Esses dados foram obtidos em http://www.arch-tec.com.br/Acustica_Arquitetonica_tx_compl.html (último acesso em 24/01/2010)

Os efeitos ondulatórios associados ao som são mais corriqueiros no nosso cotidiano, embora, talvez não tenhamos muita consciência disso. Os teatros e salas de concertos são projetados cuidadosamente para que possam ter um som de qualidade em todo o seu espaço. Ambientes mal-projetados podem ter sua qualidade sonora totalmente destruída em determinados pontos. Você pode já ter se deparado com a situação de procurar lugares em um salão onde a música ou o discurso lhe parecesse mais nítido em um show ou em um comício, por exemplo. Algumas regiões podem apresentar o som mais nítido e reforçado enquanto que em outras, praticamente nada é ouvido. Aqui, falamos de interferência sonora.

Assim como o som, a luz também exhibe difração e interferência, mas em situações menos corriqueiras. Por ter um comprimento de onda da ordem de um milhão de vezes menor que o do som no ar, a difração e a interferência da luz são fenômenos para os quais precisamos prestar atenção nas situações que nos rodeiam para observá-los. Se ela se propaga por aberturas das dimensões rotineiras como milímetros, centímetros e metros ou é barrada por obstáculos dessas mesmas dimensões, estaremos no domínio da óptica geométrica, um ramo da Física, para o qual se propaga em linha reta. Para as dimensões macroscópicas, não se fala em interferência e difração, pois estas são muito difíceis de serem detectadas. Por outro lado, se dividirmos as dimensões rotineiras por um fator de 100, 1000 ou 100000, então estaremos falando de aberturas e ou obstáculos de dimensões na faixa de micrometro. Nessa escala, estaremos no domínio da óptica física ou da óptica ondulatória, onde a luz contorna obstáculos e a superposição de dois feixes oriundos de uma fonte coerente como *laser* pode gerar ausência de luz ou escuridão.

Vamos comentar um pouco sobre as principais propriedades do fenômeno ondulatório mais diretamente relacionadas com a simulação dos efeitos ondulatórios no *software* do interferômetro de Mach-Zehnder virtual, inclusive a polarização que é exclusiva das ondas transversais, entre elas, das ondas eletromagnéticas.

2. Reflexão e Refração

O fenômeno de refração que ocorre nas ondas é observado quando uma onda depara-se com a interface entre dois meios de diferentes densidades como a superfície de separação

entre água e ar, água e óleo, ar e vidro, metal e ar, por exemplo. Na reflexão a onda volta para o meio de incidência (figura 2).

Junto com a reflexão temos também ocorrência de refração, ao passar de um meio para o outro, a mudança no índice de refração acarreta uma alteração da velocidade da onda em relação à velocidade no meio de origem da onda. Quando isso acontece, parte da onda é então refletida para o meio de origem e parte da onda se propaga para o segundo meio. A relação entre a velocidade v , o comprimento de onda λ e a frequência da onda f é relativamente simples, $v = \lambda f$. Na transição de um meio para outro, tanto o feixe refletido quanto o feixe refratado, aquele que segue pelo segundo meio, tem a mesma frequência da onda incidente. A frequência da onda não se altera, pois é uma característica da fonte, enquanto que para o feixe refratado, λ e v são proporcionalmente alterados. Um outro efeito sofrido pelas ondas quando passam por meios de diferentes densidades é a mudança de fase da onda refletida em relação à onda incidente. Mais especificamente, quando a onda se propaga de um meio menos denso para um meio mais denso, a onda refletida sofre uma inversão de fase em relação à onda incidente. Essa inversão não acontece, porém, quando a onda se propaga de um meio mais denso para um meio menos denso. É de se esperar que não possamos ver a inversão de fase de modo direto para a luz, mas os recursos de duas cordas de diferentes densidades unidas ou de cordas com uma das extremidades rigidamente fixa ou presa por uma argola que pode oscilar ao longo de uma haste permite a visualização da inversão de fase em ondas mecânicas.

Na figura 2 esquematizamos a frente de onda² da luz para ilustrar a reflexão de ondas em um espelho plano comum.

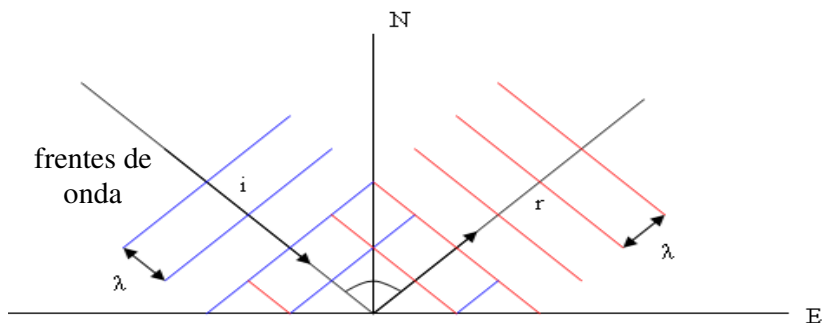


Figura 2 – Reflexão da luz em um espelho plano comum

² Uma frente de onda é o lugar geométrico de todos os pontos em que a fase de vibração harmônica de uma quantidade física é a mesma. (<http://educar.sc.usp.br/optica/luz.htm> - último acesso em 25/01/2011)

Como já comentamos, o fenômeno de refração tem por característica a travessia da interface meio 1 – meio 2 com diferentes densidades. Se o ângulo de incidência da onda é normal à superfície de separação entre os meios, então a onda refratada não sofre nenhum desvio em relação à direção da onda incidente, embora o feixe refletido possa ainda sofrer inversão de fase. Observamos apenas mudanças na sua velocidade e comprimento de onda (figura 3). Entretanto quando a onda incide com algum ângulo maior que zero e menor que 90 graus, observamos que além de variar a velocidade e o comprimento da onda, o ângulo de incidência é diferente do ângulo de refração (figura 4).

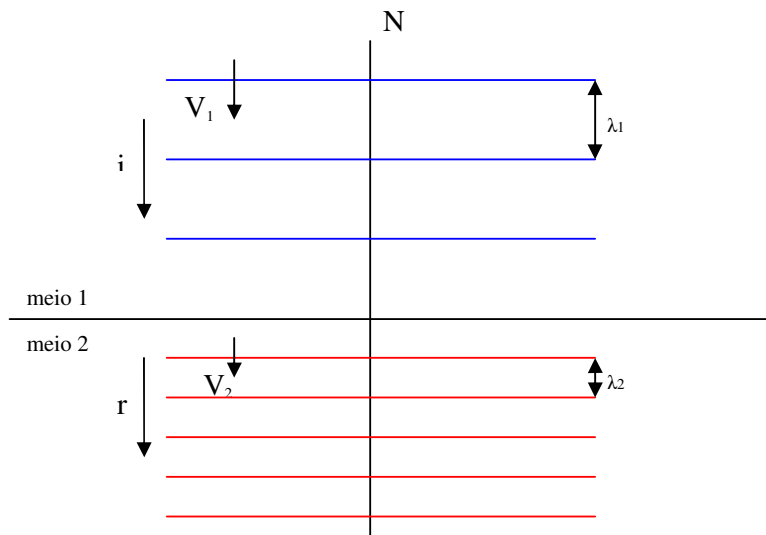


Figura 3 – Refração da luz para incidência normal à superfície de separação dos meios

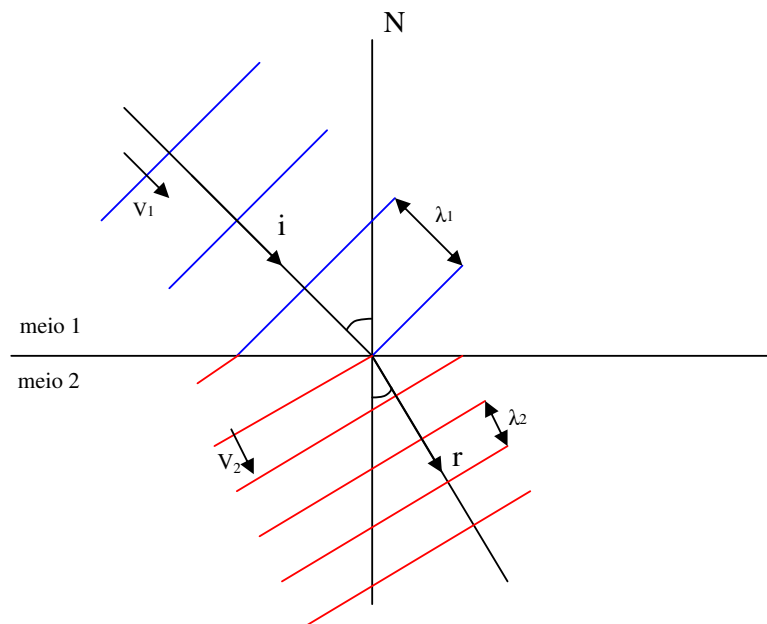


Figura 4 – Refração da luz para ângulos de incidência típicos

3. Difração

Quando uma onda mecânica ou eletromagnética encontra um obstáculo em seu caminho poderá haver difração desta onda, caso o obstáculo tenha as dimensões características da ordem de comprimento da onda em questão. Para a luz, por exemplo, temos uma melhor visualização deste fenômeno para aberturas ou obstáculos com dimensões da ordem de micrometros. A difração, no entanto, pode ser facilmente observada em um tanque com água.

Imaginemos um tanque cheio de água em repouso. Em uma das extremidades deste tanque é colocada uma régua que é movimentada para cima e para baixo periodicamente gerando ondas planas. A frequência com a qual perturbamos a superfície da água determina o comprimento de onda (distância entre as cristas) da onda gerada. Façamos ondas com comprimentos de onda de 10 cm. Agora pensemos que no meio deste tanque tem uma ripa com uma abertura relativamente estreita comparada com o comprimento da onda gerada. Façamos a abertura ter uma extensão de 1 cm. As frentes de ondas planas ao passarem pela abertura da ripa se tornam frentes de ondas circulares, ou seja, diz-se que ocorreu uma curvatura na frente de onda, isto é, ela se difratou ao passar pela abertura estreita. Este fenômeno acontece com todas as ondas contanto que as aberturas ou obstáculos tenham dimensão adequada para a onda incidente. Por isso, para abordarmos este assunto não podemos seguir os pensamentos da óptica geométrica, na qual a luz “anda” em linha reta (Halliday;1995).

4. Polarização

Ao perturbarmos uma corda com movimentos periódicos para cima e para baixo estamos gerando ondas que oscilam na direção da perturbação e que se propagam na direção perpendicular à perturbação. Podemos então efetuar as perturbações periódicas em qualquer direção de forma que as ondas geradas possam oscilar em qualquer direção também, exceto na direção de propagação, supondo que a corda seja inextensível. Assim, as oscilações podem ser ora para cima e para baixo, ora para a esquerda e para a direita, ora nas diagonais e assim por diante. Ao observamos esta situação, dizemos que a onda não está polarizada, e que

podemos polarizá-la colocando um polarizador, no qual as ondas que passam adquirem somente uma direção de oscilação determinada pelo polarizador de acordo com o eixo de polarização do mesmo.

Para a luz, não conseguimos distinguir quando a mesma é polarizada, a olho nu. Se a luz é originária de uma fonte for polarizada, a utilização de um polarizador indicará o eixo de sua polarização. Se usarmos dois polarizadores com eixos de polarização perpendiculares entre si, podemos bloquear a passagem de luz, mesmo que esta não esteja inicialmente polarizada. Esse é um excelente teste para se comprar óculos de sol polarizados. Use dois óculos idênticos e sobreponha a lente do primeiro perpendicular à lente do segundo. Se os óculos forem de boa qualidade, esse teste deve mostrar que eles diminuem bastante a intensidade da luz. No exemplo demonstrado na figura 5, o primeiro polarizador realiza uma polarização de 90° no feixe de luz que incide sobre ele, deixando-a polarizada com este ângulo.

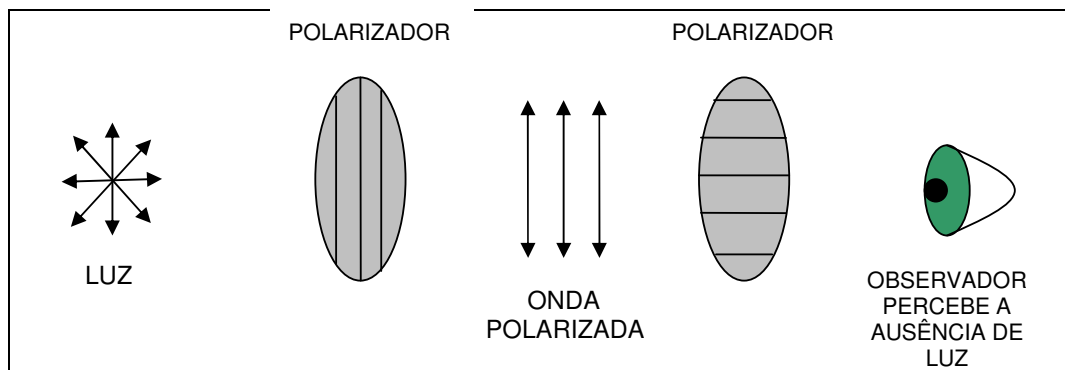


Figura 5 – Polarização da luz. As linhas verticais indicam as linhas de transmissão ou eixos de polarização dos polarizadores.

A finalização desse texto será um comentário sobre o interferômetro virtual de Mach-Zehnder (IMZ) que é um arranjo experimental pouco comentado nos livros de Física para graduação e que não aparece nos livros didáticos do Ensino Médio. O IMZ pode substituir a fenda dupla para explicar os fenômenos ondulatórios da luz, pois é mais didático. Sendo assim, é um ótimo recurso para que os professores possam trabalhar com seus alunos questões como difração, polarização e, sobretudo, interferência luminosa. O interferômetro virtual de Mach-Zehnder é um *software* educacional do tipo bancada que apresenta inúmeras

possibilidades de arranjos experimentais (virtuais) e que trabalha, inclusive, com a polarização da luz. Ao trabalharmos com *laser* incidindo em espelhos semi-refletores, ela será em parte transmitida e em parte refletida. Ao montarmos um arranjo adequado de espelhos podemos fazer essas ondas se reencontrarem de modo a se superpor gerando padrões de interferência. O uso de fontes polarizadas e polarizadores no IMZ mostram claramente os conceitos fundamentais de interferência da luz, descritos a seguir.

5. Interferência

Ao escutarmos a palavra interferência nos vem à mente a superposição de ondas, pois a interferência é resultado de superposição de duas ou mais ondas. A interferência é um fenômeno característico exclusivo das ondas, tanto das mecânicas, cuja propagação depende de um meio, quanto das eletromagnéticas que se propagam no vácuo. Os exemplos mais citados em livros didáticos são as interferências causadas pela superposição de ondas em uma corda, ondas geradas na água em um tanque, ondas sonoras e interferência com luz através do experimento de fenda dupla (Gaspar, 2001; Hewitt, 2002; Ramalho, 1999). Encontramos outros exemplos de interferência nas bolhas de sabão, manchas de óleo no asfalto, nas asas da borboleta morpho (Halliday, 1995; Tipler, 2000), casos onde a luz é refletida por películas muito finas chamadas de filmes finos, criando as condições físicas requeridas para a observação do fenômeno da interferência luminosa.

Uma aplicação tecnológica da interferência da luz, entre muitas outras, é o uso de filmes finos ou películas de monóxido de silício (Halliday, 1995) em pára-brisa de carro. A espessura das películas pode ser previamente calculada para que haja interferência destrutiva da luz para os comprimentos de onda centrais no espectro visível, diminuindo consideravelmente a reflexão desses comprimentos de onda. As interferências construtivas realçam a amplitude da onda resultante, enquanto que há um aniquilamento da amplitude na interferência destrutiva. Este recurso também é utilizado em filmes para vidros de janelas para redução do aquecimento do ambiente e em filmes para lentes de câmeras fotográficas (GREF, 2005) para redução da reflexão da luz. Citaremos exemplos de interferência em ondas mecânicas por serem mais rotineiros em nossa experiência cotidiana, mas nosso foco principal é a interferência da luz.

Neste ponto, será necessário abordarmos um conceito vital para a observação da interferência luminosa. Não é somente necessário somarmos duas ondas de luz para observarmos a interferência, mas as ondas devem satisfazer à condição de que a diferença de fase entre elas deve ser mantida constante ao longo do tempo. Se a diferença de fase entre duas ondas é constante, dizemos que os feixes são coerentes, ou que as ondas são coerentes. Luz proveniente de lâmpadas de filamentos, lâmpadas de mercúrio e fontes extensas em geral, é dita luz não-coerente. Por outro lado, o *laser* é naturalmente uma fonte de luz coerente. Podemos dividir um feixe de *laser* em dois com o uso de um espelho semi-refletor e usar espelhos de modo conveniente para colocar esses dois feixes em superposição. Como os feixes que se combinam são provenientes da mesma fonte e a fonte é coerente, então os feixes são ditos coerentes. A perda da coerência dos feixes por fatores externos destrói o padrão de interferência das ondas. A condição de ondas coerentes é uma condição geral para interferência e não somente condição para ondas luminosas. Voltaremos mais adiante a descrever melhor a questão da coerência da luz.

5.1 Interferência em uma corda

Temos ondas sendo geradas nas extremidades de uma corda, por exemplo, e estas ondas se propagam na mesma direção, com mesma amplitude e frequência, porém, em sentidos opostos como pode ser visto na figura 6. Ou seja, elas estão em fase e por isso, ao se superporem se diz que houve interferência construtiva. Caso elas possuam as mesmas características do exemplo acima, mas estejam defasadas de π rad (180°) ou $\lambda/2$, então elas se anularão gerando uma interferência destrutiva.

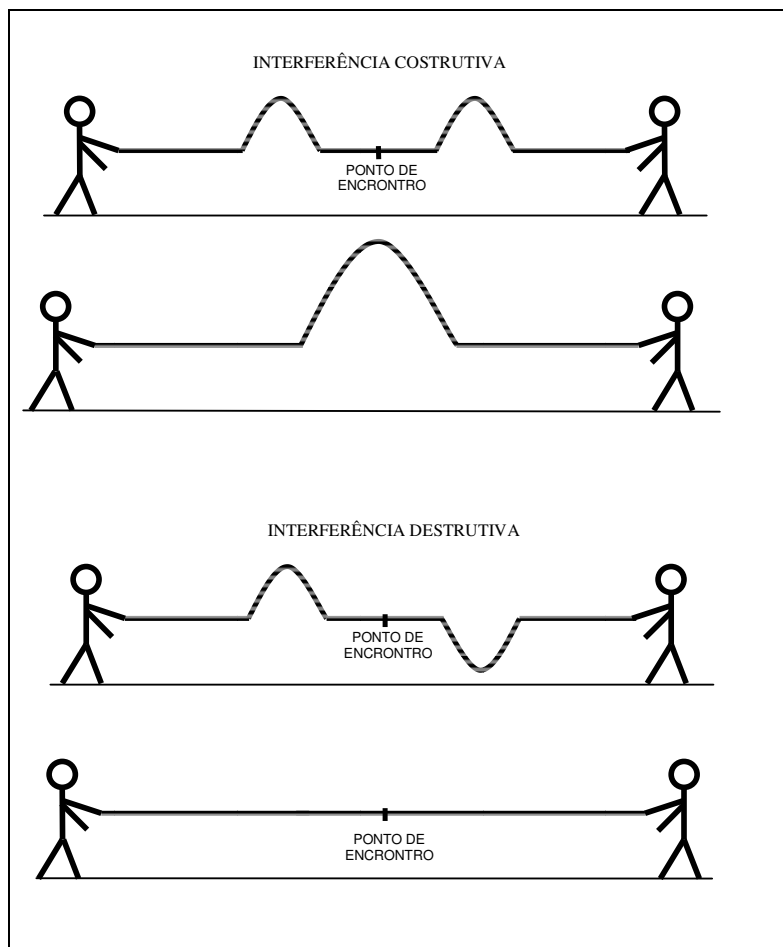


Figura 6 – Interferência construtiva e destrutiva em uma corda

5.2 Interferência em um tanque com água

A superposição de ondas em um tanque de água pode ser gerada por movimentos sincronizados de dois ou mais objetos pequenos. Se o movimento for perfeitamente sincronizado geram-se ondas coerentes que resultam em um padrão de interferência, onde podemos observar que quando duas cristas ou dois vales se encontram, eles se reforçam e temos uma interferência construtiva. Porém, quando um vale se superpõe a uma crista ocorre interferência destrutiva, sua amplitude é nula neste ponto.

5.3 Interferência sonora

O fenômeno de interferência sonora também ocorre por superposição de ondas, porém o som é apresentado por ondas longitudinais, que podem ser formadas por diferentes fontes ou por reflexão. Neste caso, as cristas de uma onda correspondem à zona de compressão e o ventre de rarefação.

Quando as ondas estão em fase, se tem uma interferência construtiva. Já quando as ondas estão defasadas de $\lambda/2$ ou π rad temos interferência destrutiva, na qual se observa a ausência parcial ou total do som, dependendo dessa diferença de fase.

Observe os esquemas gráficos mostrando o comportamento de duas ondas sonoras cuja interferência é construtiva (figura 7) e destrutiva (figura 8):

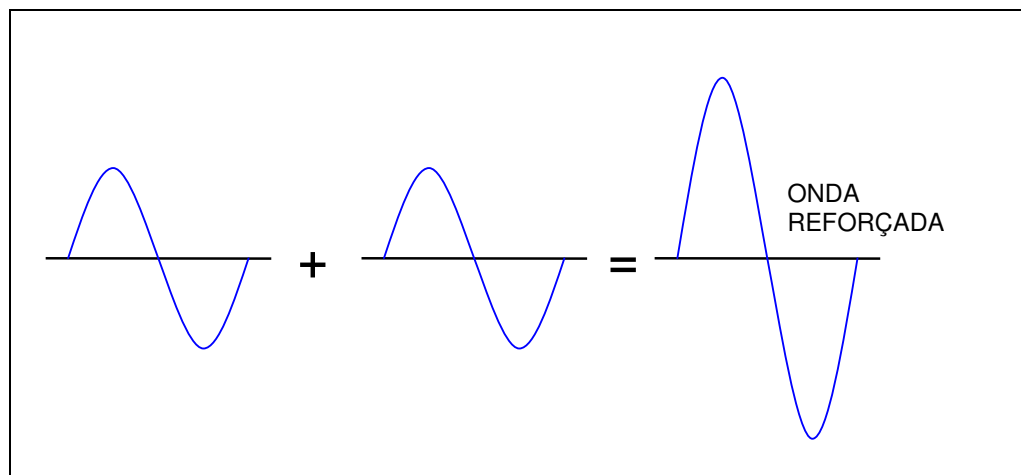


Figura 7 – Interferência Construtiva

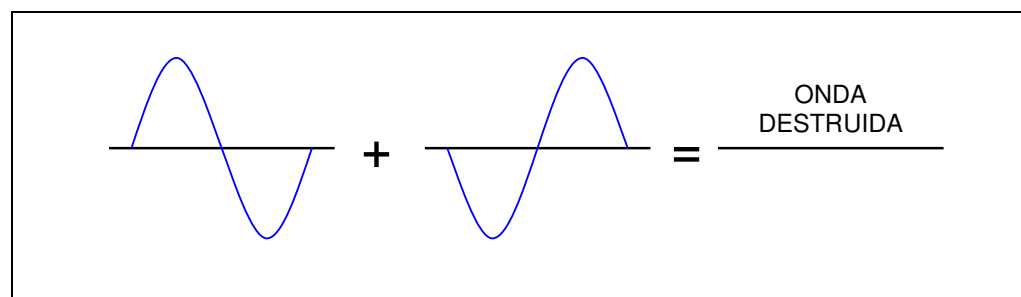


Figura 8 – Interferência Destrutiva

Há muitos exemplos de interferência sonora. Encontramos interferência sonora destrutiva quando aproximamos duas caixas de som, uma de frente à outra, na qual foram invertidas as fases de entrada. Esse tipo de interferência destrutiva é usado na tecnologia do anti-ruído. Alguns pilotos de avião e operadores de britadeiras utilizam um tipo de fone de ouvido que recebem sinais que cancelam o barulho, através das superposições das zonas de compressão e rarefação (Hewitt, 2002).

5.4 Interferência Luminosa

E a luz, o que é? Um fenômeno ondulatório ou corpuscular? Para responder essa pergunta, iniciaremos comentando fatos desde os primeiros pensamentos sobre a natureza da luz.

Começamos pelo cientista Isaac Newton (1642 a 1727) que defendia a idéia de um comportamento corpuscular para a luz, pois ela se apresentava como uma trajetória retilínea e era constituída por pequenas partículas emitidas por uma fonte. Esse modelo explicava vários fenômenos da óptica, porém não explicava porque a luz tinha sua velocidade maior na água do que no ar. Newton não conseguiu comprovar experimentalmente este fato, mas como seu prestígio era suficiente para a maior parte da comunidade científica, poucos ousaram criticar ou questionar suas idéias.

Porém esses poucos existiram, um deles foi Christian Huygens (1629 a 1695) que questionou uma teoria ondulatória para a luz. Ele acreditava que a luz se propaga através de ondas como o som, mas como ela necessitava de um meio, imaginou a existência de um, dando o nome de éter. Na teoria ondulatória a velocidade da luz na água deveria ser menor que no ar.

Já o século XIX foi de valiosas descobertas para a teoria ondulatória da luz. Em 1801, o cientista e médico Thomas Young (1773 a 1829) ficou famoso por comprovar experimentalmente que a luz tinha um comportamento ondulatório, através do experimento da dupla fenda. E anos depois o cientista Leon Foucault (1819 a 1868) comprovou que a sua

velocidade no ar era maior que na água, dando maior credibilidade, pelo menos provisoriamente, à teoria ondulatória da luz.

5.4.1 A que veio contribuir para a Física o experimento da dupla fenda

Com o experimento da dupla fenda pode-se argumentar em favor da teoria ondulatória da luz e também descobriu-se, através de cálculos, os valores de importantes grandezas físicas, como o comprimento de onda da luz.

5.4.2 Experimento da dupla fenda de Thomas Young

O experimento foi considerado relativamente simples, porém muito eficaz. Seja uma fonte de luz monocromática, duas telas opacas A e B, sendo que no centro da tela A existe um pequeno orifício S_0 (de raio da ordem do comprimento de onda da luz incidente) e na tela B há dois pequenos orifícios retangulares S_1 e S_2 com a dimensão em uma direção muito maior que a dimensão na direção perpendicular. S_1 e S_2 são equidistantes de S_0 e temos também um anteparo.

Young imaginou que se a luz apresenta um comportamento corpuscular, cuja propagação é retilínea, essa somente passaria pelo orifício da parede A, e com isso nada se veria no anteparo (Gaspar, 2001; Halliday, 1995). No entanto não foi isso que aconteceu. A luz ao passar pelo orifício da tela A difratou-se, chegando como ondas esféricas na tela B, passando pelos orifícios S_1 e S_2 e propagando-se até o anteparo. No qual se observa um padrão de superposição das ondas provenientes de S_1 e S_2 . O padrão de interferência pode ser descrito sucintamente como uma alternância de regiões iluminadas e regiões escuras comumente chamadas de franjas claras e franjas escuras. Não se pode explicar a alternância de claro e escuro com uma teoria corpuscular da luz, de forma que este experimento evidencia ou privilegia uma teoria ondulatória da luz.

Para realizar este experimento, Thomas Young teve que usar da tela A, pois a luz que ele usou não era coerente. Não temos certeza se foi luz de uma vela ou mesmo a luz do Sol, mas o fato é que não havia *laser* na época de Young e a tela A é necessária para que se

consiga um grau mínimo de coerência para os feixes que passam pelos dois orifícios na tela B. Hoje, porém, com a utilização do *laser*, a tela A não tem função, podendo ser descartada.

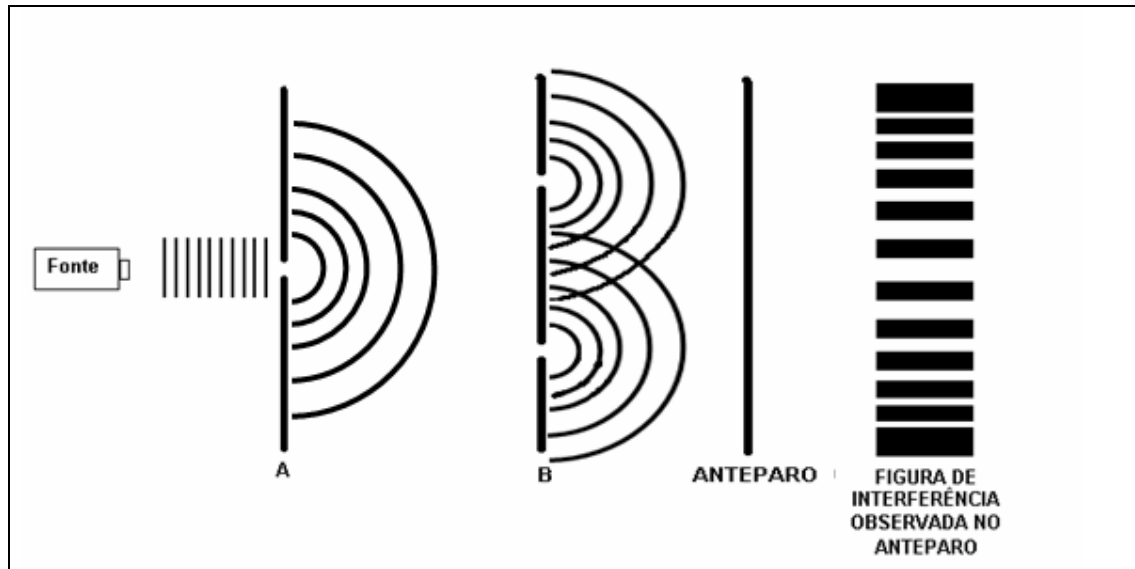


Figura 9- Experimento de Thomas Young

Tanto a luz do Sol, como de uma vela ou de uma lâmpada de tungstênio (referidas como luz branca) são compostas por ondas de vários comprimentos de onda e que não mantêm nenhuma razão constante entre suas fases ao longo do tempo ou à medida que se propagam no espaço. Essas fontes são, tipicamente, não coerentes. Mostramos na figura 10 ondas ao longo do tempo e em uma posição fixa do espaço para: (a) as ondas de uma luz branca, com diferentes comprimentos de onda, ou diferentes frequências e defasadas entre si; (b) as ondas de uma fonte de luz monocromática com ondas com diferentes defasagens (observe que as cristas não coincidem), (c) as ondas de uma fonte monocromática geradas todas em fase. A ilustração em (c) representa bem uma fonte coerente como o *laser*. É importante salientar que quando uma onda está defasada em relação a outra por qualquer fase, isso não quer dizer que o seu comprimento de onda é diferente, ou que mudou.

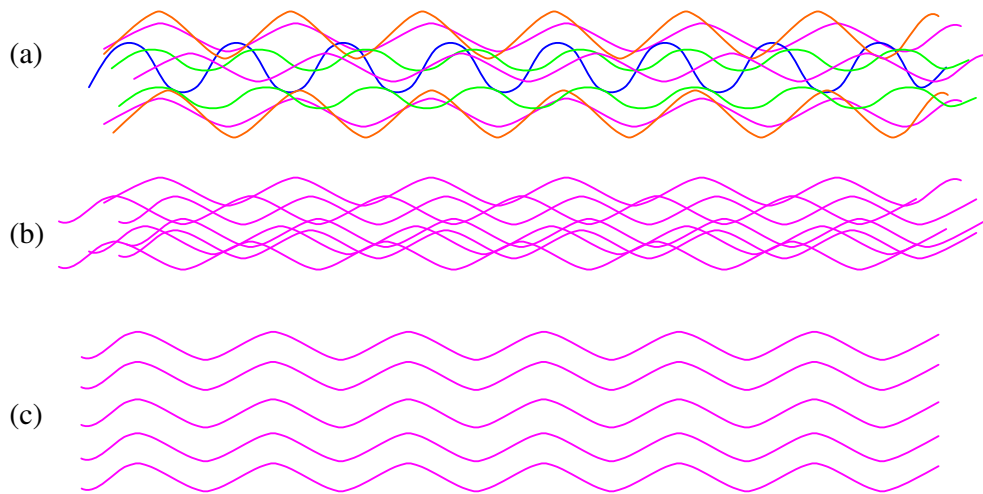


Figura 10 – Ilustração de luz coerente e não-coerente—feixe de luz não-coerente; (a) ondas emitidas por uma fonte de luz branca não coerente, (b) ondas emitidas por uma fonte monocromática coerente e (c) ondas emitidas por um *laser*.

5.4.3 Cálculo do comprimento da onda de luz

Analisando o experimento de dupla fenda podemos, através de cálculos trigonométricos, estimar o comprimento da onda da luz. Porém para facilitar o desenvolver matemático, a distância entre a tela B e o anteparo deve ser relativamente grande, tanto que a aproximação $D \gg d$ seja válida, sendo D a distância entre a tela B e o anteparo e d a distância entre as fendas na tela B conforme o esquema na figura 11. Nessa aproximação pode-se assumir que as retas x_1 e x_2 são próximas à fenda dupla, localmente paralelas e que o ângulo θ é muito pequeno. As retas x_1 e x_2 representam as direções de propagação das ondas provenientes da fenda superior e da fenda inferior respectivamente. Quando ângulo θ é próximo de zero, matematicamente, temos em radianos $\text{sen } \theta \approx \tan \theta \approx \theta$.

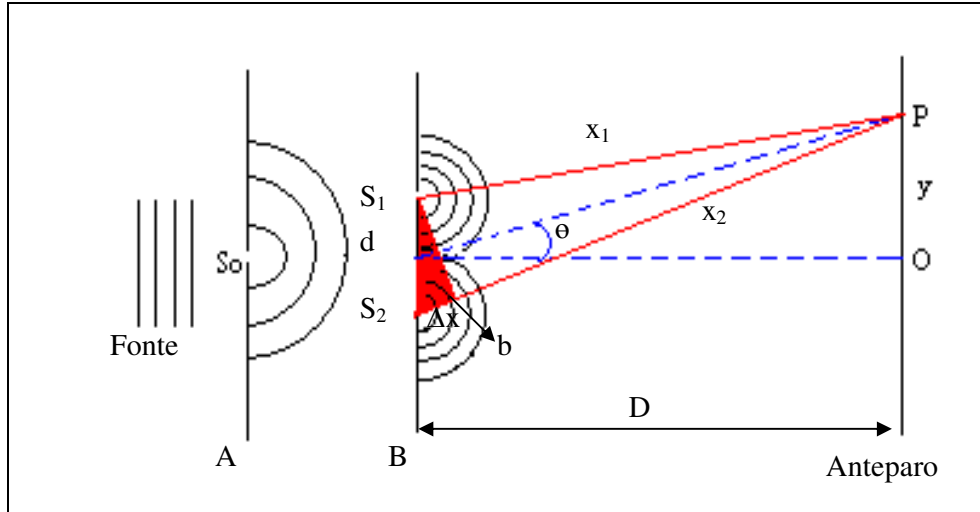


Figura 11 – Análise trigonométrica do experimento (não em escala)

Se selecionarmos um ponto P no anteparo, próximo ao centro de anteparo, teremos a figura do triângulo maior, destacado em azul, de forma que:

$$\tan \theta = \frac{y}{D} \quad (01)$$

Seguindo esse raciocínio analisamos o triângulo menor, destacado em vermelho. Deduzimos que:

$$\text{sen} \theta = \frac{\Delta x}{d} \quad (02)$$

Como $\text{sen} \theta = \tan \theta$

$$\frac{y}{D} = \frac{\Delta x}{d}$$

$$\Delta x = \frac{yd}{D} \quad (03)$$

Numa situação real usando um *laser* de He-Ne usado como apontador em seminários e aulas, poderíamos ter fendas de alguns décimos de micrometro separadas por alguns micrometros na tela B e o anteparo a uma distância de um metro da tela B. Com um arranjo nessas condições podemos responder com uma matemática relativamente simples, se um ponto arbitrário P no anteparo está em uma franja clara ou escura. Para isso, basta calcular a

diferença de percurso ou de caminho óptico entre os feixes x_1 e x_2 que corresponde a defasagem entre as ondas que passaram pelas fendas e que chegam em P. Não é difícil mostrar que se a diferença de percurso entre os feixes x_1 e x_2 for de 2π radianos ou equivalentemente, de um número inteiro de comprimentos de onda, então temos interferência construtiva. Por outro lado, se os feixes estiverem defasados de π rad ou equivalentemente de meio comprimento de onda, teremos uma região de interferência destrutiva. O centro do anteparo é sempre iluminado e tem, portanto, uma franja brilhante denotada por $m = 0$. As faixas escuras que estão próximas do centro, uma acima e a outra abaixo, simetricamente distribuídas em relação à franja central, também são denotadas por $m = 0$, mas correspondem a mínimos de interferência. As próximas franjas claras ou escuras são denotadas por $m = 1$, $m = 2$, e assim sucessivamente.

Em resumo, quando a diferença de percurso das duas ondas (Δx) for igual a zero ou a um número inteiro de comprimento de onda, teremos uma interferência construtiva, ou seja, faixas claras, brilhantes.

$$\Delta x = m\lambda \quad (04)$$

para $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Ao igualarmos as equações (04) e (03), temos o valor do comprimento de onda luminosa para a interferência construtiva, podendo assim classificar inclusive a cor desta fonte.

$$m\lambda = \frac{yd}{D}$$

$$\lambda = \frac{yd}{mD} \quad (05)$$

No entanto, quando a diferença de percurso entre as duas ondas for igual a um número semi-inteiro de comprimentos de onda teremos interferência destrutiva, ou seja, faixas escuras.

$$\Delta x = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (06)$$

para $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

Igualando as equações (06) e (03) obteremos o valor do comprimento de onda luminosa para uma interferência destrutiva.

$$\left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = \frac{yd}{D}$$

$$\lambda = \frac{2yd}{D(2m+1)} \quad (07)$$

5.4.4 Intensidade das franjas de interferência

Anteriormente vimos equações nas quais podemos localizar através do ângulo θ os máximos e mínimos de interferência. Com este mesmo experimento, podemos obter a equação da intensidade luminosa destas franjas em função de θ .

Imaginemos que componentes de um campo elétrico estejam integradas às ondas luminosas que chegam a um ponto P, sendo elas (para o *laser*):

$$E_1 = E_0 \text{sen}(kx - wt)$$

$$E_2 = E_0 \text{sen}(kx - wt + \phi),$$

sendo $w = 2\pi/T$ a frequência angular das ondas e T seus períodos, $k = 2\pi/\lambda$ o número de onda e ϕ é a diferença de fase que neste caso é mantida constante, pois as ondas são coerentes. E_0 é a amplitude do campo elétrico da onda que é igual para as duas ondas, pois vamos supor que as fendas sejam de mesmo tamanho. Com base nesses dados podemos calcular o campo elétrico resultante no ponto P usando algumas relações trigonométricas bastante conhecidas (Halliday, 1995; Tipler, 2000). Seja então:

$$E_p = E_1 + E_2$$

$$E_p = E_0 \text{sen}(kx - wt) + E_0 \text{sen}(kx - wt + \phi)$$

$$E_p = E_0 [\text{sen}(kx - wt) + \text{sen}(kx - wt + \phi)] \quad (08)$$

Lembrando que:

$$\text{sen}(a + b) = \text{sen}(a)\cos(b) + \text{sen}(b)\cos(a)$$

$$\text{sen}(a - b) = \text{sen}(a)\cos(b) - \text{sen}(b)\cos(a)$$

$$\text{sen}(a + b) + \text{sen}(a - b) = 2\text{sen}(a)\cos(b)$$

Sendo assim, podemos definir que:

$$a + b = kx - wt + \phi \quad (09)$$

$$a - b = kx - wt \quad (10)$$

Efetuada um sistema destas equações teremos:

$$2a = 2kx - 2wt + \phi$$

$$a = kx - wt + \frac{\phi}{2}$$

Substituindo para achar o valor de b:

$$a + b = kx - wt + \phi$$

$$kx - wt + \frac{\phi}{2} + b = kx - wt + \phi$$

$$b = kx - kx - wt + wt + \phi - \frac{\phi}{2}$$

$$b = \frac{\phi}{2}$$


Substituindo na equação (08) a (09) e a (10):

$$E_p = E_0 [\text{sen}(kx - wt) + \text{sen}(kx - wt + \phi)]$$

$$E_p = E_0 [\text{sen}(a - b) + \text{sen}(a + b)]$$

$$E_p = E_0 [2\text{sen}(a) \cos(b)]$$

$$E_p = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \text{sen}\left(kx - wt + \frac{\phi}{2}\right)$$


 Amplitude da
 onda
 resultante

Como a intensidade da onda luminosa é proporcional à amplitude da onda ao quadrado (Halliday, 1995), temos especificamente para o campo elétrico que $I_0 = (E_0)^2 / (2 \mu_0 c)$ sendo E_0 a amplitude da onda, μ_0 uma constante (a permeabilidade magnética no vácuo) e c a velocidade da luz no vácuo. Ou seja, obtemos a intensidade da onda resultante no ponto P do anteparo I_p em função da intensidade da onda que passa por uma das fendas I_0

$$I_p = 4 I_0 \cos^2(\phi / 2).$$

Esse resultado mostra que a intensidade pode ser nula quando o cosseno for zero e atingir o valor máximo de $4I_0$ quando o cosseno for +1 ou -1. Além disso, o cosseno é uma

função periódica de forma que há então alternância de máximos (franjas claras) e mínimos (franjas escuras).

5.5 Abertura Circular

O padrão de interferência luminosa que aparece no anteparo esquematizado na figura 9 pode variar, isto é, dependendo do valor da abertura das fendas por onde passa a luz, da distância entre as fendas e mais genericamente, da própria geometria da fenda. No experimento de dupla fenda, ela é retangular com uma altura pequena e largura grande comparada á altura. Em decorrência dessa geometria aparece um tipo de franja retangular com uma altura grande e largura pequena. Caso o orifício seja circular, aparecerá um disco luminoso no meio do anteparo circundado por anéis escuros e luminosos alternados. Notamos também um enfraquecimento na intensidade do brilho dos anéis claros à medida que se afastam do centro do anteparo. Quando o experimento tem em sua tela apenas um orifício obtém-se um padrão de difração luminosa e quando a tela possui dois ou mais orifícios, o padrão observado é de interferência e difração da luz. De fato, Augustin Jean Fresnel (1788 a 1827) ao relacionar a experiência de Young e o Princípio de Huygens concluiu que a difração da luz é resultado de uma interferência (Barthem, 2005; Bassalo, 1988; Nussenzveig, 1998).

Segundo relato em vários textos (Barthem, 2005; Bassalo, 1988; Nussenzveig, 1998), no ano de 1818, promoveu-se um concurso de dissertações sobre difração que teve como vencedor Augustin Jean Fresnel, engenheiro militar que dissertou a respeito da teoria ondulatória da luz. Porém, Fresnel foi desafiado a comprovar experimentalmente sua teoria, pois de acordo com alguns dos jurados do concurso, o matemático e seguidor da teoria newtoniana Simèon Denis Poisson (1781 a 1840), afirmou, através de cálculos, que para a teoria de Fresnel estar correta no centro do anteparo, ao invés de termos uma mancha totalmente escura teríamos uma mancha escura com um ponto brilhante no centro. Para a surpresa de muitos, e com a ajuda de seu amigo físico Dominique François Arago (1786 a 1853), que também era juiz deste mesmo concurso, Fresnel conseguiu mostrar experimentalmente sua teoria, que deduzia que ao iluminar um disco opaco veríamos no anteparo uma figura de difração com anéis escuros e brilhantes. Porém, no centro desta figura teríamos um ponto brilhante conhecido, por muitos anos, como ponto brilhante de Poisson e mais tarde teve o nome de Fresnel.

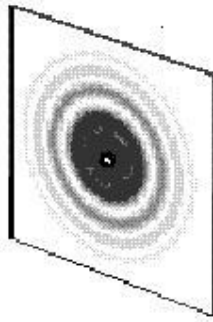


Figura 12 – Ponto brilhante de Fresnel

Ao montarmos um experimento com abertura circular, o processo é semelhante ao de fenda dupla. O que muda é a geometria do orifício e conseqüentemente, a geometria do padrão de difração ou interferência. Caso tenhamos apenas um orifício circular, a figura que aparecerá no anteparo será semelhante à figura de difração de Fresnel, e apenas contrária para seus anéis luminosos.

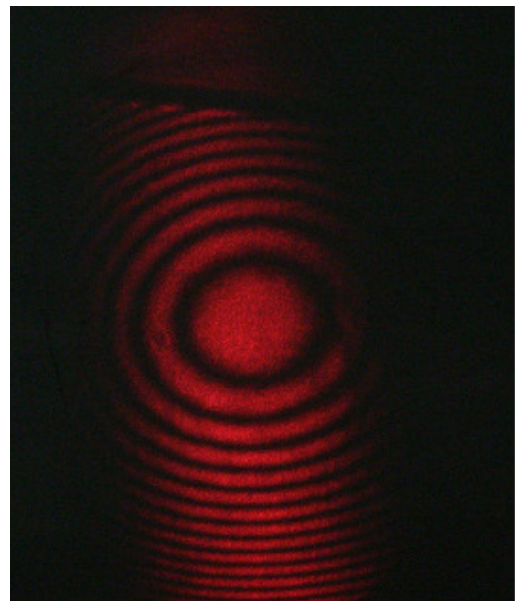
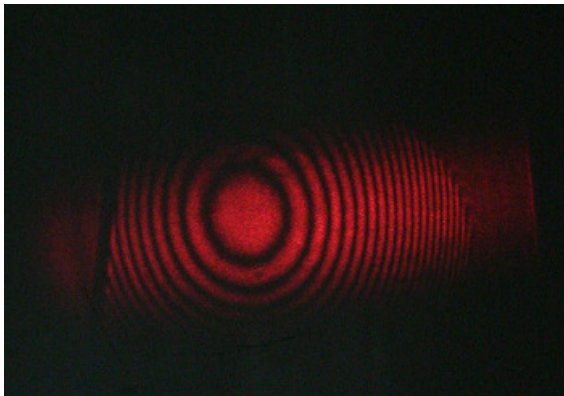


Figura 13 – Fotos feitas no laboratório de Física da UFRGS

Outro físico e óptico que trabalhou com difração em abertura circular foi Joseph von Fraunhofer (1787 a 1826), que possui deduções matemáticas mais simples que as formadas pelas figuras de difração de Fresnel, por serem observadas num ponto onde podemos dizer

que seus raios que passam pela abertura e chegam ao anteparo são paralelos. Podendo ser analisada matematicamente como o experimento da fenda dupla. Sua diferença é referente à sua forma circular que exige o fator 1,22 nas suas equações (Halliday, 1995). O primeiro mínimo ou o raio do primeiro anel escuro a contar do centro da figura de difração da abertura circular é dado por:

$$\text{sen}\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}, \text{ onde } d \text{ é o diâmetro da abertura circular.}$$

Na aproximação do anteparo longe da abertura circular, os raios luminosos são localmente paralelos e vale também aqui a aproximação em radianos de $\text{sen}\theta = \theta$, ou seja:

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

5.6 Interferômetro de Mach-Zehnder

Ao pesquisarmos o fenômeno da luz, é comum notarmos a quantidade de livros e artigos que descrevem o experimento da fenda dupla e cálculos referentes a este experimento. Porém, podemos utilizar outros recursos a fim de entendermos os fenômenos de interferência luminosa. Um experimento que tem potencial didático muito satisfatório é o interferômetro de Mach-Zehnder. A divisão do feixe de luz em dois novos feixes e a posterior recombinação para gerar interferência é bastante natural já a primeira vista. O padrão de interferência observado no anteparo é um padrão circular, pois vamos utilizar um *laser* de abertura circular.

Este interferômetro é um instrumento relativamente simples, e foi construído pela primeira vez em 1892. Usamos uma fonte luminosa monocromática, mais especificamente um *laser*, dois espelhos semi-refletores que refletem e transmitem na mesma proporção 50% do feixe incidente, dois espelhos comuns que refletem 100% do raio incidente e dois anteparos para observação do padrão de interferência. A figura 14 foi retirada de um *software* educacional e mostra o arranjo de um interferômetro de Mach-Zehnder. Hoje, temos a nossa disposição esse experimento virtual livre e de fácil acesso, que apresenta diversas possibilidades de aplicações no ensino da óptica ondulatória da Física Moderna (Ricci, et al, 2006).

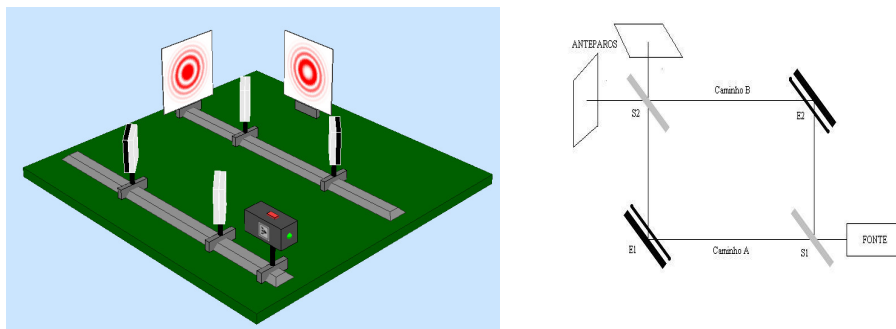


Figura 14 – Interferômetro virtual de Mach-Zehnder obtida do *software* e seu esquema

Imaginemos um modelo deste experimento. Liga-se a fonte luminosa e esta incide sobre o primeiro espelho semi-refletor S_1 tal que 50% da onda incidente é transmitida e segue pelo caminho A e 50% é refletida seguindo pelo caminho B. Ambas as partes, transmitida e refletida, deparam-se com espelhos comuns sendo totalmente refletidas. A onda inicialmente transmitida encontrou o espelho E_1 , e a onda inicialmente refletida encontrou o espelho E_2 . Depois de refletidas em E_1 e E_2 essas ondas se reencontram no segundo espelho semi-refletor S_2 . Nesse espelho, os feixes são recombinados e produzem a imagem de um padrão de anéis claros e escuros alternados nos anteparos. Como podemos observar na figura 14 o centro de um anteparo é iluminado, enquanto que o outro não. Isto ocorre por haver uma diferença de fase entre as ondas: refletida e transmitida, já que não há diferença no caminho percorrido pelas ondas. A distância dos caminhos A e B é igual. Porém toda onda refletida nos semi-espelhos sofre uma mudança de fase de $\lambda/4$ em relação à onda incidente e, toda onda refletida por um espelho comum sofre uma mudança de fase de $\lambda/2$ (Pessoa Jr., 2003). As ondas transmitidas não sofrem mudança de fase ao passarem tanto pelo espelho comum quanto pelo semi-espelho.

Desenvolveremos na seqüência um certo número de experimentações utilizando o interferômetro de Mach-Zehnder virtual para explorarmos mais especificamente, o fenômeno da interferência da luz. Esse *software* permite que se trabalhe com os fenômenos ondulatórios da luz no regime clássico quando usamos a fonte *laser*. Há, no entanto, uma segunda opção para o uso de uma fonte de fótons únicos, o chamado regime monofotônico, para a qual alguns dos conceitos mais fundamentais da física quântica se tornam necessários para explicar os resultados das simulações. O elo entre esses dois regimes, a luz no regime clássico através do *laser* e a luz no regime quântico, através da fonte monofotônica, pode ser facilmente

construído através de uma boa compreensão da óptica ondulatória. A teoria ondulatória da luz pode *trazer a luz* às várias questões relativas à Física Moderna e à mecânica quântica. A óptica ondulatória é ponte para o aprendizado dos conceitos mais fundamentais e iniciais da Física na escala quântica.

Referências Bibliográficas:

BARTHEM, R. *A luz*. São Paulo: Livraria da Física, v. 2, 2005.

BASSALO, J. M. F. *Fresnel: o formulador matemático da teoria ondulatória da luz*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 79-87, ago. 1988.

GASPAR, A. *Física*, São Paulo: Ática, 2001.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA- GREF. *Física 2*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

HALLIDAY, D.; RESNICK.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. Rio de Janeiro: LTC, v.4, 1995.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, v. 4, 1998. (livro mais recomendado para leitura final).

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D. *Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, Jun. 2005.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; RICCI, T. R. O tratamento clássico do Interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento de fenda dupla na introdução da Física Quântica. . Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-88, 2007.

PESSOA JUNIOR, O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

RAMALHO, F. J.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Os fundamentos da física*. São Paulo, v.2, Editora Moderna, 1999.

Software educacional livre do Interferômetro de Mach-Zehnder. Disponível em:
www.if.ufrgs.br/~fernanda

TIPLER, Paul A. *Física*, São Paulo: LTC-Livros Técnicos e Científicos, v. 4, 2000.

Instruções sobre o *software* e guias experimentais do IMZ.

Temos acesso livre ao *software* do interferômetro de Mach-Zehnder, com sua versão em três idiomas, no sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> ou, se preferirmos, podemos salvá-lo nos nossos microcomputadores ou mesmo em disquete, pois eventualmente a página pode estar “fora do ar” e para não prejudicarmos a nossa aula teremos essas outras opções.

Primeiramente acessamos o sítio <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda> que apresenta a seguinte estrutura:

Prof. Fernanda Ostermann
Instituto de Física
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Interferômetro de Mach-Zehnder
Copyright (c) 2005 Fernanda Ostermann e Sandra Denise Prado
Projeto Edital Universal - 08/2004 do CNPq.

Fernanda Ostermann (Coordenadora do Projeto)
Fávia Rezende (Vice-coordenadora)
Sandra Denise Prado (Colaboradora)
Trieste dos Santos Freire Ricci (Colaborador)
Leandro Augusto Frata Fernandes (Programador)

Esse programa é distribuído gratuitamente e é destituído de qualquer garantia.
Esse programa não é de domínio público.

Gostaríamos de agradecer ao CNPq pelo apoio ao projeto 'Tópicos de Física Moderna e Contemporânea na Formação de Professores e Fundamentos Epistemológicos para a Prática Docente'. Processo 475.851/04-8

Download aqui
[Mach-Zehnder.exe](#)

Então clicamos em Mach-Zehnder.exe e poderemos executar ou salvar o programa no próprio computador ou em disquete, ressalta-se que é importante termos salvo o programa em disquete, por exemplo, pois nem sempre a “rede” está disponível.

Abrindo o programa visualizamos a seguinte apresentação:

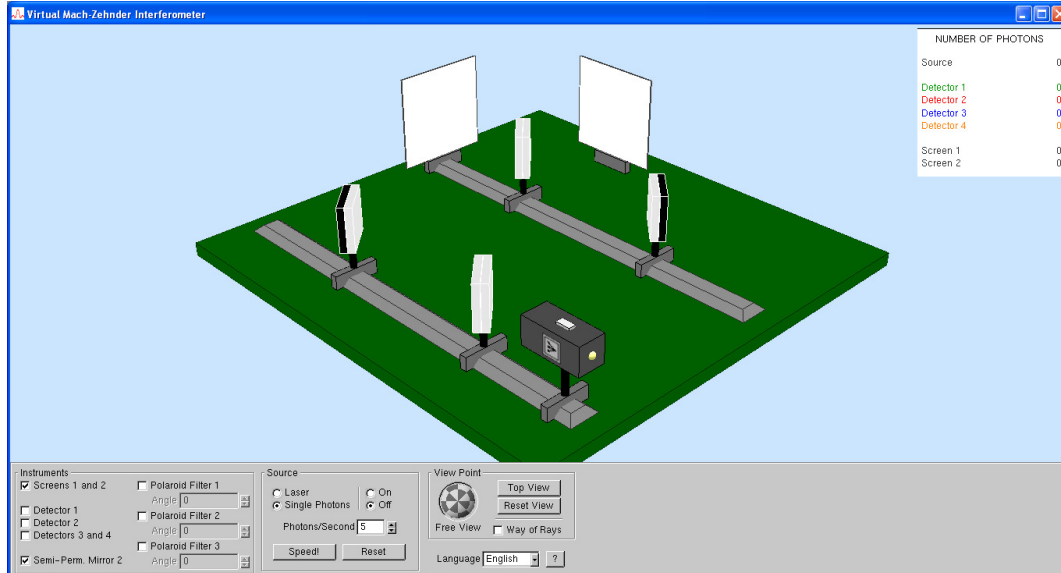


Imagem 1 – interferômetro de Mach-Zehnder

Sugerimos a opção por um idioma (inglês, português ou espanhol) e que venham a interagir com o programa nas opções: Vista Livre, assim será possível visualizar a imagem do interferômetro por vários ângulos, Vista Superior, como o próprio nome diz, teremos a imagem “vista de cima”, Reiniciar Vista que volta a imagem inicial do interferômetro, Ver Feixes mostra a trajetória da Luz. Abaixo temos um esquema mostrando o IMZ, onde E1 e E2 são espelhos comuns (que refletem 100% da luz) e S1 e S2 são espelhos semi-refletores (refletem 50% e transmitem 50% da luz).

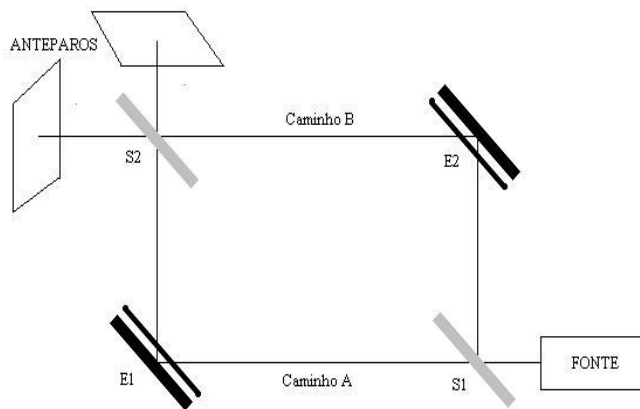


Imagem 2- Esquema do interferômetro de Mach-Zehnder

Já para fonte temos duas opções *laser* (FC) onde se pode colocar ou tirar alguns instrumentos (espelho semi-refletor 2, Filtro Polaróide 1, 2 ou 3) em vários possíveis experimentos que o professor ou os alunos queiram realizar. Estando “montado” o experimento, é só clicar na opção Ligado.

Para a opção fonte Fótons Únicos podemos mudar a velocidade Fótons/Segundo e ainda Acelerar o processo, mandando assim, mais fótons/segundo. Neste tipo de fonte, podemos utilizar todos os instrumentos (espelho semi-refletor 2, Filtro Polaróide 1, 2 ou 3, detectores 1, 2 ou 3 e 4 e os anteparos 1 e 2), porém não é possível trabalhar com todos instrumentos em um só experimento, para colocá-los ou tirá-los basta clicar no quadrado pequeno, de cor branca, na frente da palavra referente ao instrumento. Na imagem 1 aparece um retângulo branco (lado direito) que faz a contagem do número de fótons lançados pela fonte.

Agora que já conhecemos um pouco do programa, vamos trabalhar com alguns guias experimentais.

Sugestão de um guia experimental para o interferômetro virtual de Mach-Zehnder (IMZ)

- 1) Já com o programa aberto, observamos as barras e as ferramentas de que compõem esse *software*.
- 2) Identifique agora o caminho seguido pelos raios luminosos, que é ilustrado em uma animação de um feixe colimado se propagando. Clique em Ver Feixes.
- 3) Identifique os aparatos divisores de feixes (semi-espelhos ou espelhos semi-refletores). Justifique sua resposta.
- 4) Escolha para fonte a opção *laser* e observe o que aparece nos anteparos. Explique o que você vê, lembrando que o feixe de luz refletido no espelho comum muda de fase por um fator de π rad, enquanto o outro a mudança é de $\pi/2$ rad, que corresponde a um avanço de $1/4$ de comprimento de onda da luz.
- 5) Tente explicar esse fenômeno (o resultado obtido nesse experimento). A luz apresenta qual comportamento?

- 6) Agora, remova desse arranjo o espelho semi-refletor 2 e repita todo o processo. Tente explicar esse resultado.
- 7) Você saberia dizer qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nestes dois casos, com e sem o segundo espelho semi-refletor, sabendo apenas que esse feixe de *laser* emitido pela fonte tem intensidade I_0 ?
- 8) Compare os dois experimentos, a que conclusões você chegou a respeito da luz?

Sugestão de outros guias experimentais, agora usando polaróides

Sugestão 1.

- 1) Você saberia dizer o que acontecerá se apresentarmos os polaróides aos experimentos?
- 2) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com o espelho semi-refletor 2. Porém, agora vamos inserir em nosso experimento polaróides. Ative o primeiro polaróide (Filtro Polaróide 1) e ele aparecerá em um dos braços do interferômetro. Clicar na opção: Ligado. Qual o padrão observado nas telas (anteparos)?
- 3) Agora mude o ângulo de seu polaróide para 90° e argumente o que observamos nas telas.
- 4) Analisando as perguntas 2 e 3, é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?
- 5) Com esse mesmo arranjo, acrescente um segundo polaróide (Filtro Polaróide 2), os dois com o ângulo em 90° e ligue o experimento. O que aparece nos anteparos? Agora é possível dizer se a fonte é ou não polarizada?

Sugestão 2.

- 1) Continuamos com a mesma opção de fonte *laser* e com os dois polaróides em ângulos de 90° (Filtro Polaróide 1 e 2). Porém, agora vamos retirar o espelho semi-refletor 2 de nosso experimento, em seguida clicar na opção: Ligado. Explique o padrão visto nas telas (anteparos). Qual sua conclusão em relação à polarização desta fonte?
- 2) Agora mude os ângulos dos polaróides para 180° e argumente o que observamos nas telas.
- 3) Monte um guia experimental usando a fonte *laser* e os polaróides.

Sugestão de guias experimentais, agora usando como fonte fótons únicos

Sugestão 1.

- 1) A partir de meados da década de 1980, os avanços tecnológicos tornaram possível implementar fontes luminosas que operam em regime (quântico) monofotônico, quando a intensidade é tão baixa que um fóton é emitido por vez¹. Ligue a fonte luminosa em regime monofotônico clicando na opção Fótons Únicos. Observe o que aparece em cada um dos anteparos.
- 2) A partir do que se observa em cada um dos anteparos, como se manifesta o comportamento corpuscular (comportamento de partícula) de cada fóton? Quando o número de fótons emitidos já atingiu um valor muito grande, como se manifesta o comportamento ondulatório?
- 3) Compare o padrão que vai se formando nos anteparos com o padrão que foi observado quando tínhamos como opção de fonte o *laser*.
- 4) Adicione o detector 1 (D1) ou o detector 2 (D2). Observe os números registrados no canto superior desta janela e repare que uma luzinha acende na fonte, sempre que um fóton é emitido, e quando o fóton passa pelo detector este também acende uma luzinha. Relacione a contagem de fótons no detector escolhido com os números de fótons que chegam aos anteparos. Compare o padrão observado nos anteparos com o padrão para *laser* sem o segundo espelho semi-refletor.
- 5) Ainda nesta situação proposta, qual o efeito do detector 1 ou do detector 2?
- 6) Agora acrescente no outro braço deste aparato o detector 1 ou o detector 2, o que não foi usado na opção anterior. A fonte continua na opção Fótons Únicos. Clique em Ligado. Responda o que você observa nos contadores dos detectores (janela no lado superior) e nas pequenas lâmpadas dos detectores e da fonte e nas telas? Se você clicar na opção Acelerar, o que você observa nas contagens dos detectores?
- 7) A que conclusões você chegou ao comparar os experimentos cuja fonte era *laser* com os experimentos cuja fonte era fótons únicos?

Sugestão 2.

- 1) Verifique se estão ativadas as opções do espelho semi-refletor e se os anteparos 1 e 2 estão presentes. Ative o primeiro polaróide em 0° (Filtro Polaróide 1) num dos braços do

¹ Veja os artigos de Hogg, C.K. & Mandel, L., em Phys. Ver. Lett. 56, 58 (1986), e o de Grangier, P., Roger, G. & Aspect, A., em Europhysics Letters 1, 173 (1986).

interferômetro. Ligue a fonte em Fótons Únicos e depois de esperar que um número muito grande de fótons saiam da fonte, qual o padrão que você observa nos anteparos?

2) Repita o experimento mudando o ângulo deste polaróide para 90° . Qual padrão você observa nos anteparos?

3) Coloque, agora, o segundo polaróide (Filtro Polaróide 2) no outro braço, cujos ângulos devem ser de 90° . Após um número grande de impactos, o que você observa nas telas?

4) Mude os ângulos para 0° . O que você observa nos anteparos (após um grande número de fótons emitidos)?

5) Conserve o ângulo 0° no Filtro Polaróide 2 e mude para 90° o ângulo do Filtro Polaróide 1. Novamente após ocorrido um grande número de impactos você pode concluir se a fonte é ou não polarizada?

6) Com o mesmo arranjo da questão anterior, retire o segundo espelho semi-refletor e explique o padrão visto nos anteparos. Qual sua conclusão em relação à polarização do fóton?

7) Vamos analisar a seguinte situação: cada fóton é detectado na tela como um objeto localizado, que possui o atributo posição. É natural, então, perguntar: no interferômetro, o fóton também possui a propriedade posição como um atributo bem definido? Tente propor uma maneira de realizar isto usando os polaróides.

Sugestão 3.

1) Coloque novamente o espelho semi-refletor 2 e inclua nesse novo arranjo os Filtros Polaróides 1 e 2, um em cada braço do experimento, com os **eixos cruzados** em 90° (um deles em 0° e o outro em 90°), esta será uma maneira de sabermos por qual dos braços (caminho) passou cada fóton. Se o fóton passar por um dos braços apenas, terá necessariamente que emergir do interferômetro com sua polarização dada pelo eixo de polaróide que se encontra naquele braço, por isso devemos colocar o Filtro Polaróide 3 colocado entre o espelho semi-refletor 2 e ao anteparo. Tanto faz se o ângulo for de 0° ou 90° , pois o eixo de polarização será paralelo a um polaróide e ortogonal ao outro, de maneira que o fóton que chegar a tela terá passado pelo braço onde se encontrava o polaróide com eixo paralelo ao do terceiro polaróide. Façamos isso.

2) Gradue o polarizador 1 (Filtro Polaróide 1) em 0° ou em 360° , coloque o terceiro polaróide na saída do interferômetro e gradue seu ângulo de modo que seu eixo seja paralelo ao primeiro polaróide. Já o segundo gradue em 90° ou 270° , em seguida ligue a fonte em regime

monofotônico, ou seja, opção Fótons Únicos, e espere até que se acumule um grande número de impactos. O que você observa?

3) Quando observamos um padrão de interferência na tela, os fótons possuíam este atributo posição dentro do interferômetro? E quando não se observa esse padrão de interferência? Por quê?

4) Um argumento óbvio é que o fóton poderia ter se dividido em duas partes no primeiro separador de feixe, atravessado o aparelho e, de alguma forma, ter recombinado-se no segundo separador de feixe. Verifique se isso é verdade ou não.

5) Troque os dois polaróides 1 e 2 por dois detectores de fótons. Verifique através da luzinha que tem em cada detector se existe simultaneidade com a entrada de cada fóton individual no aparelho. O que você observa?

6) Com os dois espelhos semi-espelhos presentes no interferômetro e somente com os dois detectores de fótons, D3 e D4, colocados, respectivamente, sobre o eixo central das saídas 1 e 2 do aparelho, qual seria a probabilidade do fóton ser detectado por D3? E por D4?

7) O que você sugeriria para melhorar este *software*?

Texto de apoio ao professor de Física II.

Alguns dos princípios mais fundamentais da física quântica à luz do interferômetro virtual de Mach-Zehnder

Esse é um texto bastante introdutório e sucinto sobre algumas das questões relativas aos princípios mais fundamentais da física quântica (FQ) – o princípio da superposição - que podem ser trabalhadas com o recurso do *software* do interferômetro de Mach-Zehnder. É importante ressaltar que um trabalho mais extensivo no *software* em regime clássico permite uma melhor compreensão dos resultados das simulações no regime quântico ou, também dito, monofônico (um fóton de cada vez). É, portanto, fortemente recomendado que se esgote os recursos do *software* no regime clássico antes de qualquer investida no regime monofônico.

Luz é simplesmente luz ou uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo com uma velocidade de cerca de $3 \cdot 10^8$ m/s. Ela transporta energia através do vácuo cuja medida é dada pelo que chamamos de intensidade da luz. A intensidade de uma onda é proporcional ao quadrado da amplitude da onda. No caso da luz, em particular, a intensidade da luz é proporcional ao quadrado da amplitude de seu campo elétrico. Esses conceitos todos são os conceitos clássicos da luz. O que queremos dizer, então, com o regime quântico da luz?

A física quântica parece algo muito incomum e surpreendentemente estranha. Ela foge ao nosso bom senso e fica difícil descrever seus fenômenos com a percepção que ganhamos da natureza ao longo de nossas vidas. E de fato, a FQ é realmente incomum para a escala de percepção dos nossos sentidos, pois sua escala de atuação é o mundo microscópico nas dimensões de alguns Angstroms. Divida um centímetro um milhão de vezes e então esse resultado por cem – essa é a escala de domínio da FQ. Ela nos diz que os fenômenos físicos nessa escala são realmente diferentes dos fenômenos físicos da escala macroscópica: e por que teriam que ser os mesmos?

Parece natural agora que para observarmos a luz no regime quântico, não possamos simplesmente olhar através da janela e observar algo lá fora – as condições ideais estão em laboratórios sofisticados ou em resultados microscópicos, para os quais, a teoria que

explica o fenômeno tenha raiz na FQ, mas que o fenômeno microscópico em si, não pode ser diretamente visualizado – a radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico são fenômenos macroscópicos que mostram indiretamente a natureza quântica da luz (Halliday 1995, Tipler 2000, Hewitt 2002, GREF 2005, Ramalho 1999). Aliás, foi para explicar a radiação emitida por um corpo em equilíbrio térmico em um forno à temperatura T (a radiação de corpo negro), que Max Karl Ernest Ludwig Planck (1858-1947) em 1900, se deparou com a dificuldade de usar uma teoria clássica para a luz. Para conseguir ajustar sua teoria aos dados experimentais, Planck percebeu que a intensidade de uma onda eletromagnética não poderia mais ser dada em termos do quadrado da amplitude do campo elétrico, mas sim em termos do número de fótons, sendo que cada fóton tem uma energia bem determinada pela frequência da onda. Dessa forma, segundo Planck, se uma onda eletromagnética com frequência ν tem N fótons, então a energia do fóton é $E=h\nu$, sendo $h = 6,626196 \cdot 10^{-34}$ J.s a constante de Planck e a energia total é $Nh\nu$. A idéia de Planck foi usada com sucesso por Niels Henrik David Bohr (1885-1962) para modelar o átomo de hidrogênio e explicar os saltos quânticos, isto é, as transições eletrônicas entre os estados de energia permitidos com a absorção ou emissão de fótons. A natureza quantizada da FQ aparece nas energias permitidas que o elétron pode ter em um átomo. Costumamos dizer que o espectro de energia dos átomos é discreto, que é o mesmo que dizer quantizado, o que faz entender que os átomos não podem emitir ou absorver luz de todas as cores, mas somente as cores específicas para o átomo em questão. Aqui, falamos de cores, para dar mais vida ao texto. Para sermos mais precisos, deveríamos falar em frequências, pois um átomo pode emitir ou absorver fótons com frequências além do espectro visível.

O termo fóton propriamente foi estabelecido por Einstein em seu trabalho sobre o Efeito Fotoelétrico (1905) - os fótons de uma luz podem, sob certas condições, arrancar elétrons de uma placa metálica. Na época de Planck, o termo usado era *quantum* (grão de luz, partícula de luz). O plural de *quantum* é *quanta* (Barthen, 2005) e decorre disso o nome de física quântica. Tanto a teoria ondulatória da luz quanto a teoria dos quanta descrevem bem a luz, mas precisamos estar conscientes de que a luz mostra essas duas facetas – onda e corpúsculos – em situações físicas bem diferentes. Ou usamos uma teoria com sucesso ou outra – as duas teorias não podem descrever a mesma experiência com sucesso – princípio da complementaridade (Halliday 1995, Pessoa Jr. 2003).

Para ganhar um pouco de intuição sobre o regime quântico da luz, vamos realizar um experimento mental: pense que você está próximo de uma vela em um quarto escuro. Imagine que não haja nada mais além de você mesmo e a vela no quarto e que as dimensões do quarto sejam realmente grandes, tão grandes que poderíamos considerar um quarto de dimensões cosmológicas. Agora, supomos que a vela produza um número muito grande de fótons por segundo. Próximo da vela, seus olhos captaram muitos e muitos fótons por segundo e o que você observa pode ser descrito pela teoria clássica da luz. Suponha agora que você se afaste da vela. Os fótons são emitidos em todas as direções e se propagam em linha reta de forma que seus olhos recebem somente parte dos fótons emitidos a cada segundo. Então você vê a vela perdendo intensidade. Afaste-se ainda mais e mais – haverá alguma distância a partir da qual, seus olhos detectarão apenas um pontinho de luz e ocasionalmente outro em outro instante. Você está tão distante que a esfera na qual os N fótons se distribuem tem um raio muito grande. A possibilidade de um fóton atingir sua retina diminui com a sua distância da vela. Essa situação poderia, grosseiramente, representar uma fonte monofotônica ou o regime quântico da luz.

A maioria dos livros didáticos elege a experiência da dupla fenda de Young para trabalhar os fenômenos ondulatórios da luz, pois a experiência pode ser realizada em um laboratório, usando-se um *laser* com resultados visuais de grande impacto. No entanto, essa experiência é também transportada para os textos introdutórios de Física Moderna para mostrar o princípio da superposição na FQ e não é nada natural para o aluno a transposição do conceito de onda para o entendimento que o fóton (a partícula de luz) se comporta como onda nessa experiência e como corpúsculo em outras situações. Essa é a dualidade onda-partícula para a luz.

A dualidade onda-partícula é mais um entre os fundamentos da FQ. A dualidade onda-partícula foi proposta por Einstein em 1905 e generalizada por Louis de Broglie (1892-1987) em 1925 para qualquer corpo de massa m com uma velocidade v . Corpos macroscópicos também exibiriam, por princípio, dualidade onda-partícula, mas essa dualidade não pode ser detectada com a precisão dos instrumentos atuais. O princípio de de Broglie atribui um comprimento de onda de matéria λ_B para a partícula com momentum linear $p=mv$: $\lambda_B = \frac{h}{p}$.

Dessa forma, elétrons, prótons, nêutrons, átomos e partículas da escala atômica e subatômica podem se comportar como ondas em algumas situações e como partículas em outras.

Atualmente são classificadas como Física Clássica a mecânica clássica, a termodinâmica e o eletromagnetismo clássico. A dita Física Moderna se refere aos primórdios da física quântica nos anos entre o advento da constante de Planck em 1900 e até meados de 1930, quando a teoria quântica já estava bem mais formalizada. A partir de 1930 costumamos nos referir a uma mecânica quântica ou física quântica (FQ). A relatividade especial e a relatividade geral de Einstein progrediram também nos tempos da Física Moderna. Podemos dizer que a FQ abrange as questões da superposição de ondas, a dualidade onda-partícula, o princípio da incerteza, o problema do colapso da onda ou o problema da medida, o determinismo versus indeterminismo, o salto quântico entre outros.

O interferômetro virtual de Mach-Zehnder permite trabalhar os conceitos de superposição, dualidade onda-partícula, o problema da medida e do indeterminismo, de modo quase que natural e com algum cuidado, o princípio da incerteza é trabalhado com alunos de disciplinas introdutórias em nível de graduação. Para o Ensino Médio a parte mais acessível aos estudantes é a questão de por qual caminho rumou o fóton e, portanto, a discussão do princípio da superposição e do colapso da onda. A óptica ondulatória serve aqui de base para a elaboração de conceitos novos. Não podemos esquecer que se passarmos do regime monofotônico para o regime de muitos fótons de cada vez, os resultados ondulatórios clássicos são recuperados (princípio da correspondência de Bohr) (Halliday, 1995).

Abaixo colocamos algumas situações para você experimentar virtualmente diferentes arranjos experimentais e perceber o surgimento ou não de um padrão de interferência no anteparo. Quando a fonte é *laser* ou mesmo fótons únicos, temos um padrão de interferência no anteparo, devido à superposição de ondas. Quando emitimos um fóton por vez, diminuimos a intensidade da fonte a ponto de emitir um único fóton de cada vez e observamos uma detecção pontual do fóton no anteparo, ou seja, característica de um comportamento corpuscular. Entretanto, a posição detectada no anteparo segue um padrão de interferência igual àquele obtido quando ligamos o *laser*. Isso leva o aluno a se questionar que tipo de comportamento o fóton apresenta afinal: ondulatório ou corpuscular? Engajados nesta dúvida, abordamos conceitos da FQ como, por exemplo, a dualidade onda-partícula. É natural que esse tipo de discussão exija do professor algumas leituras adicionais (Halliday

1995, Hewitt 2002, Eisberg 1988, Tipler 2000). Há também muitos artigos nas revistas brasileiras de ensino de Física (Ostermann e Prado 2005, Ostermann e Ricci 2004, Ostermann e Ricci 2005, Ostermann, Padro e Ricci 2007, Barros 1999, Sales 2008, Terrazzan 1992) que abordam essa temática.

Com o uso de detectores sobre os braços do interferômetro podemos, sondar por qual caminho rumou o fóton, mas a consequência dessa tentativa inocente de seguir o fóton resulta em uma destruição do padrão de interferência. Aqui podemos discutir o problema da medida e o caráter corpuscular do fóton. Colocando-se um detector em cada braço do IMZ podemos acompanhar em várias medidas se o fóton vai pelo braço superior ou pelo braço inferior (caminho A ou B). Vamos observar que ele vai por um braço ou por outro de modo aleatório de forma que se perguntarmos a um estudante antes de emitir um fóton, por qual braço ele irá, a melhor resposta será aquela que diz que ele poderá ir tanto por um braço quanto por outro com 50% de chance. Poderemos entrar aí com a discussão do princípio da incerteza, que decorre do caráter estatístico e probabilístico da FQ. Temos ainda a opção de substituímos os detectores por polarizadores para simular o bloqueio de um dos caminhos de forma que teremos certeza sobre o caminho pelo qual ruma o fóton. Novamente, essa experiência com polarizadores reforça os resultados das simulações com detectores.

Dizemos que no mundo quântico, uma certeza na posição leva a uma incerteza grande no momentum (padrão interferência) e vice-versa. No IMZ, o conhecimento da trajetória do fóton destrói o padrão de interferência. O fato de não conseguirmos medir uma grandeza sem afetar uma segunda conjugada à primeira, mostra que por mais elaborado ou preciso ou pouco demolidor que seja o aparelho detector de fótons ou elétrons, certas medidas poderão causar uma incerteza muito grande no conhecimento de uma outra grandeza. Esse fenômeno é intrínseco na FQ e não depende do aparelho de medida em si. O caráter probabilístico, o princípio da superposição, o princípio da incerteza são todos fenômenos associados ao modelo ondulatório do mundo microscópico. O problema da medida é um fenômeno da interação da experiência em regime quântico com os aparelhos de medida, que representam o mundo macroscópico, um problema ainda em aberto na Física.

Referências Bibliográficas:

BASSALO, J. M. F. *Fresnel: o formulador matemático da teoria ondulatória da luz*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 79-87, ago. 1988.

BARROS, J. A.; CAVALCANTE, M. A.; JARDIM, V. *Inserção de física moderna no ensino médio: difração de um feixe laser*. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis, v.16, n. 2, p. 154-169, ago 1999.

GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA- GREF. *Física 2*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005.

EISBERG, R. RESNICK, R. *Física Quântica*. Rio de Janeiro: Campus, 1988.

HALLIDAY, D.; RESNICK.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. Rio de Janeiro: LTC, v. 4, 1995.

HEWITT, P. G. *Física conceitual*. Porto Alegre: Bookman, 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica*. São Paulo: Edgard Blücher, v. 4, 1998. (livro mais recomendado para leitura final)

OSTERMANN, F.; PRADO S.D. *Interpretações da mecânica quântica em um interferômetro virtual de Mach-Zehnder*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 27, n. 2, p. 193-203, Jun. 2005

OSTERMANN, F.; RICCI, T.F. *Construindo uma unidade didática conceitual sobre mecânica quântica: um estudo na formação de professores de física*. **Ciência & Educação**, Bauru, v. 10, n. 2, p. 235-257, 2004.

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. *Conceitos de física quântica na formação de professores: relato de uma experiência didática centrada no uso de experimentos virtuais*. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 22, n. 01, p. 9-35, 2005.

OSTERMANN, F.;PRADO, S. D., RICCI, T. R. *O tratamento clássico do Interferômetro de Mach-Zehnder: uma releitura mais moderna do experimento de fenda dupla na introdução da Física Quântica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 79-88, 2007.

PESSOA JUNIOR, O. *Conceitos de física quântica*. São Paulo: Livraria da Física, 2003.

RAMALHO, F. J.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Os fundamentos da física*. São Paulo, v. 2, Editora Moderna, 1999.

RAMALHO, F. J.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. *Os fundamentos da física*. São Paulo, v. 3, Editora Moderna, 1999.

SALES, G. L.; VASCONCELOS, F. H.; CASTRO FILHO, J. A.; PEQUENO, M. C. *Atividades de modelagem exploratória aplicada ao ensino de física moderna com a utilização do objeto de aprendizagem pato quântico*. Revista Brasileira de Ensino de Física, São Paulo, v. 30, n. 3, 2008.

Software educacional livre do Interferômetro de Mach-Zehnder. Disponível em:
<www.if.ufrgs.br/~fernanda>

TERRAZZAN, E.A. *A inserção da física moderna e contemporânea no ensino de física na escola de 2º grau*. Caderno Catarinense de Ensino de Física, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 209-214, dez 1992.

TIPLER, P. A. *Física*, São Paulo, v. 4, LTC-Livros Técnicos e Científicos, 2000.