



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



O efeito Faraday: exposição teórica didática e experimento de baixo custo (Material instrucional)

Vinícius de Araújo Coelho
Marcus Venicius Cougo Pinto
Carlos Farina de Souza

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Vinícius de Araújo Coelho, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

O efeito Faraday: exposição teórica didática e experimento de baixo custo (Material instrucional)

Vinícius de Araújo Coelho,
Marcus Venícius Cougo Pinto e Carlos Farina

Instituto de Física, UFRJ
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física
Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

Rio de Janeiro, RJ - 2017

1 Introdução

Este texto é um material instrucional baseado em dissertação de mesmo título, apresentada pelo primeiro autor para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física da UFRJ, e orientada pelos dois outros autores. O texto é constituído de planos de aulas sobre o efeito Faraday destinadas ao professor de ensino médio.

Apresentaremos uma proposta de três aulas (de 100 minutos) a serem ministradas em sequência para alunos do ensino médio. São várias as nossas motivações, a saber: *(i)* discutir mais detalhadamente alguns tópicos que já fazem parte do programa de física do ensino médio, como ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas; *(ii)* ampliar o conhecimento desses alunos através de pequenos experimentos desafiadores em temas correlatos a esses, como por exemplo, discutir a polarização das ondas eletromagnéticas, o fenômeno da atividade óptica natural e culminar com o efeito Faraday (descoberto por Faraday em 1845 e considerado o primeiro efeito magneto-óptico descrito detalhadamente) e *(iii)* motivar os alunos do ensino médio, despertando neles interesse e curiosidade para estudarem física sem medo.

Ao final das três aulas, esperamos que os alunos tenham uma compreensão qualitativa e semi quantitativa dos fenômenos da atividade óptica natural e do efeito Faraday. Esses tópicos foram escolhidos por serem muito ricos, pois para compreendê-los os alunos terão de entender vários conceitos importantes em física. Nesse sentido, embora as três aulas propostas exijam muito dos alunos, temos certeza de que a relação custo/benefício será bastante favorável para os alunos.

Organizamos o material de forma que, ao final das duas primeiras aulas, os alunos estejam bem preparados para a discussão sobre o tema central, feita na terceira aula. Dessa forma, na primeira aula apresentamos brevemente o conceito geral de onda e, em seguida, discutimos as ondas mecânicas, chamando a atenção dos alunos para a possibilidade de ondas transversais e longitudinais. No caso de ondas transversais, enfatizamos a propriedade de polarização desse tipo de ondas. Na segunda aula, dedicamo-nos ao estudo de ondas eletromagnéticas propagantes, com ênfase especial na polarização dessas ondas, uma vez que tais ondas são transversais. Na terceira e última aula, começamos discutindo o fenômeno da atividade óptica natural e finalizamos com uma discussão sobre o efeito Faraday.

No planejamento deste roteiro, consideramos a necessidade da participação ativa dos alunos no processo de construção do conhecimento. Nesse sentido, em cada aula há propostas de atividades práticas simples que devem ser realizadas por eles, sempre que possível, antes de qualquer apresentação expositiva sobre os assuntos tratados.

Em cada aula, entre as atividades propostas, há pequenos textos de apoio ao pro-

fessor. Através deles, abordamos os temas das aulas, buscando levar de forma resumida informações que devem direcionar as discussões iniciadas pelo professor em sala de aula. Há também, ao final de cada aula, um questionário para avaliação do conhecimento adquirido. Nele, buscamos elaborar questões com enfoque conceitual; dessa forma levamos o aluno a refletir de fato sobre a Física estudada.

A sequência didática sugerida ao professor para a realização das aulas foi pensada para que ele discuta em sala as seções na ordem em que são apresentadas no roteiro.

2 1ª aula: ondas mecânicas

Motivações e objetivos

Fenômenos de natureza ondulatória ocorrem frequentemente no dia-a-dia, seja em eventos comumente observáveis, como nas oscilações da superfície da água do mar, ou em situações não evidentes a olho nú, como nos processos de transmissão e recepção de ondas de rádio e sinais de TV.

Pela vasta aplicabilidade que possui, o estudo dos fenômenos ondulatórios se sustenta como um tema de grande importância na formação de um aluno do ensino médio. Essa formação deve estar atenta à necessidade, cada vez mais evidente, de se construir no aluno uma postura crítica diante do cenário científico e tecnológico contemporâneo, devendo, por isso, ser tratado com o maior detalhamento possível.

Entretanto, nesta primeira aula, não pretendemos esgotar todas as possibilidades de assuntos sobre os fenômenos ondulatórios; nosso objetivo é apenas discutir alguns conceitos básicos que servirão de apoio aos temas tratados nas próximas duas aulas. Dessa forma, após uma apresentação do conceito geral de onda, discutiremos a classificação das ondas em ondas mecânicas ou eletromagnéticas. Em seguida, discutiremos a classificação das ondas em transversais ou longitudinais e, por fim, trataremos o importante conceito de polarização para o caso das ondas mecânicas transversais.

2.1 Conceito geral de ondas

Nesta seção, o professor deverá apresentar aos alunos o conceito geral de onda e discutir a classificação de ondas mecânicas ou eletromagnéticas.

De um modo geral, uma onda é uma sequência de sinais que se propagam com ou sem periodicidade em um meio não havendo transporte de matéria, mas apenas de energia. Como elas ocorrem em diversas situações na natureza, os sinais que dão origem às ondas apresentam as formas mais variadas. Por exemplo, quando uma pedra é atirada em um lago, as sucessivas elevações que se deslocam pela água caracterizam sinais (ou perturbações), ou quando uma pessoa move periodicamente a extremidade de uma corda esticada, as elevações que se propagam pela corda também são sinais. Nestes dois casos, as ondas apresentam uma característica em comum, a saber, ambas necessitam de um meio material para se propagarem e, por esse motivo, são denominadas ondas mecânicas. Em outras palavras, ondas mecânicas são aquelas que se propagam somente através de um meio material. Ondas luminosas ou de raio-X, que são classificadas como eletromagnéticas, muito

embora se propaguem em meios materiais, também podem se propagar no espaço vazio, sendo esta uma propriedade particular à classe das ondas eletromagnéticas. De um modo bem resumido, uma onda eletromagnética é qualquer sinal formado por campos elétricos e magnéticos que se propaguem em um meio material ou mesmo no vácuo, sendo esta última característica a que mais diferencia ondas eletromagnéticas de ondas mecânicas.

As características particulares das ondas mecânicas e eletromagnéticas devem ser tratadas com atenção pelo professor e, por isso, as próximas seções desta aula serão destinadas apenas ao estudo das ondas mecânicas, ficando para a próxima aula o estudo detalhado das ondas eletromagnéticas.

2.2 Ondas mecânicas

Nesta seção, o professor discutirá inicialmente com os alunos as características das propagações transversais e longitudinais em ondas mecânicas e, em seguida, o conceito de polarização das ondas transversais.

2.2.1 Ondas transversais e longitudinais

Esta subseção é destinada ao tratamento das propagações transversais e longitudinais. Antes de apresentar os conceitos de forma expositiva, o professor deverá realizar com os alunos algumas atividades práticas bem simples, com o propósito de instigar neles a curiosidade pelo tema. Dito isto, é sugerido ao professor a realização das seguintes atividades.

Atividade 1

Mantenha uma corda esticada com uma extremidade fixa em um ponto da sala de aula e a outra extremidade na mão de um aluno. Em seguida, peça ao aluno que realize os seguintes procedimentos.

- a) Mover a extremidade da corda em movimento oscilatório em linha reta em direções perpendiculares à orientação da corda esticada.
- b) Mover a extremidade da corda em movimento circular uniforme.
- c) Mover a extremidade da corda em movimentos oscilatórios em linha reta na direção da corda esticada.

Perguntas

- 1) Das três situações experimentadas nessa atividade, em qual ou em quais houve propagação de sinais entre as extremidades da corda?
- 2) Em cada caso onde houve propagação de sinais, descreva brevemente como foi o movimento realizado pela corda? Faça uma ilustração deste movimento (desenho) em uma folha.

Atividade 2

Mantenha uma mola de brinquedo (conhecida como mola maluca) esticada com uma extremidade fixa em um ponto da sala de aula e a outra extremidade na mão de um aluno. Em seguida, pedir ao aluno que realize os seguintes procedimentos.

- a) Mover a extremidade da mola em movimento oscilatório em linha reta e em direções perpendiculares à orientação do eixo da mola esticada.
- b) Mover a extremidade da mola em movimento circular uniforme.
- c) Mover a extremidade da mola em movimentos oscilatórios em linha reta na direção do eixo da mola esticada.

Perguntas

- 1) Das três situações experimentadas nesta atividade, em qual ou em quais houve propagação de sinais entre as extremidades da mola?
- 2) Em cada caso onde houve propagação de sinais, descreva brevemente como foi o movimento realizado pela mola? Faça uma ilustração deste movimento em uma folha.

Finalizadas as atividades, os alunos estarão em condições de assimilar mais concretamente os conceitos que se pretende tratar nesta subseção. Neste momento, o professor deverá prosseguir a aula, definindo os dois principais tipos de ondas mecânicas.

Dentre as mais variadas formas em que se apresentam as ondas mecânicas, existem diferenças no modo de propagação, no que se destacam dois grupos: (i) ondas transversais e (ii) ondas longitudinais. Quando os sinais que formam a onda produzem no meio material oscilações perpendiculares à direção de propagação, ela é dita transversal. Em contrapartida, quando os sinais que formam a onda produzem no meio material oscilações paralelas à direção de propagação, ela é dita longitudinal. As figuras 1 e 2 ilustram bem a diferença entre ondas transversais e longitudinais com os dois exemplos discutidos nas atividades anteriores.

Onda transversal

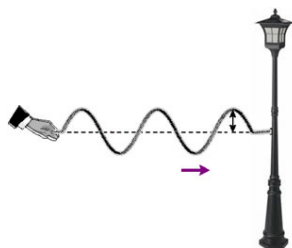


Figura 1:

Onda em uma corda esticada.

Onda longitudinal

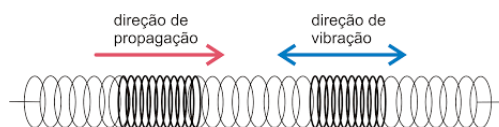


Figura 2:

Onda em uma mola de brinquedo.

Um exemplo clássico de onda longitudinal, que o professor deve mencionar em aula, é a onda sonora na atmosfera. Neste caso, os sinais que se propagam são constituídos por uma sucessão de compressões e rarefações da massa de ar, como ilustra a figura 3.

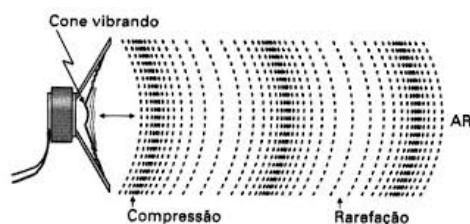


Figura 3:

Onda sonora emitida por um autofalante.

Sobre as possíveis formas de propagação de uma onda mecânica é importante deixar claro aos alunos que, embora existam apenas as duas classificações tratadas, há casos de ondas que não podem ser chamadas de transversais ou longitudinais. Um exemplo é a onda no mar, que leva o meio a oscilar tanto perpendicularmente quanto paralelamente à sua direção de propagação. Tal fato pode ser observado colocando um pedaço de cortiça sobre a água do mar. Em intervalos de tempo regulares, com a passagem dos sinais, a cortiça realiza movimentos aproximadamente circulares em torno de um ponto fixo, evidenciando o comportamento peculiar desse tipo de onda.

Ainda nesta subseção, convém ao professor enfatizar a diferença entre as ondas transversais produzidas por uma fonte que realiza movimento circular uniforme, como aquela na corda no item **b** da atividade 1, e as ondas longitudinais, como a produzida na mola no item **c** da atividade 2. Essa intervenção tem por objetivo desconstruir no aluno uma possível impressão errada de que não há diferença quanto à forma de propagação entre esses dois tipos de onda. Tal equívoco por parte do aluno pode se dar em razão da semelhança com que se apresentam os meios de propagação nos dois casos. De fato, o movimento circular da fonte dá à corda uma forma espiralada, que lembra a mola, mas o

que importa é que nessa forma espiralada cada ponto da corda realiza movimento em um plano fixo perpendicular à direção de propagação. Colocando de forma mais objetiva, o que se pretende é desmistificar no aluno o conceito errado de que a onda gerada na corda por uma fonte que realiza movimento circular uniforme é do tipo longitudinal. Para isso é sugerido ao professor que, antes de qualquer esclarecimento ou explicação no que se refere a essa questão, pergunte aos alunos em quais itens das atividades 1 e 2 as ondas produzidas são transversais e em quais itens são longitudinais. Desta forma o professor estará convidando o aluno a refletir sobre a questão, o que torna a sua participação mais ativa no processo de ensino e aprendizagem. Depois de ouvir os alunos é então o momento de responder à pergunta, deixando bem claro que a onda do item b da atividade 1 é do tipo transversal.

2.2.2 Polarização

Nesta subseção, o professor deverá apresentar brevemente a importante propriedade de polarização das ondas mecânicas transversais e, em seguida, discutir o funcionamento de um instrumento conhecido como polarizador, cuja finalidade é mudar o estado de polarização das ondas transversais.

A polarização de uma onda transversal é definida pela direção de oscilação dos pontos do meio enquanto ela se propaga. Desse modo, a onda na corda da figura 4 tem polarização do tipo linear, porque os pontos da corda oscilam na direção de uma reta fixa perpendicular à direção de propagação. Já a onda da figura 5 tem polarização do tipo circular, porque cada ponto da corda realiza um movimento circular em um plano ortogonal à direção de propagação.

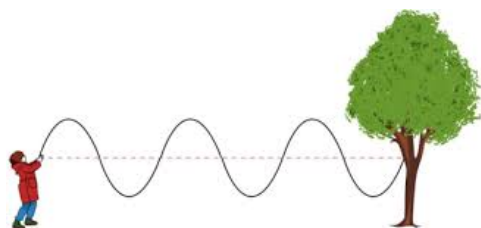


Figura 4:
polarização linear.

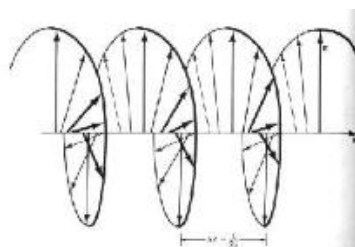


Figura 5:
polarização circular.

No caso da polarização circular, cabe ao professor esclarecer ainda que existem duas possibilidades: as polarizações esquerda (ou levógira) e direita (ou dextrógira). No caso da polarização circular esquerda, a onda se propaga de modo que a corda toma a forma de uma espiral girando no sentido anti-horário, para quem observa os sinais chegando. Já

no caso da polarização circular direita, a onda se propaga de modo que a corda toma a forma de uma espiral girando no sentido horário, para quem observa a onda chegando. Essas duas polarizações circulares estão ilustradas nas figuras 6 e 7 onde, em cada uma delas, a orientação de propagação da onda coincide com a do eixo do cilindro esboçado.

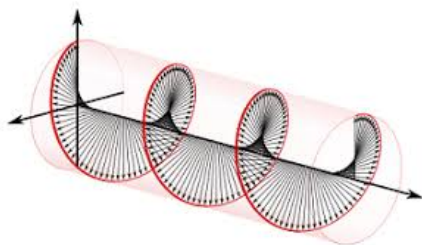


Figura 6:

Polarização circular esquerda.

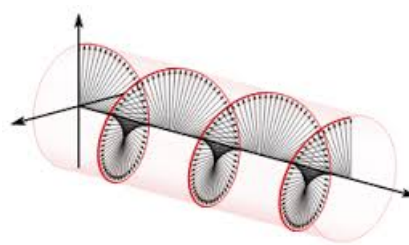


Figura 7:

Polarização circular direita.

Depois de apresentar o conceito de polarização e exemplificar com os dois casos mais comuns, que são as polarizações linear e circular, o professor deverá passar a discutir o procedimento que se realiza para alterar o estado de polarização de uma onda, transformando, por exemplo, uma onda circularmente polarizada em uma onda linearmente polarizada. Para isso será necessário usar um instrumento conhecido como filtro polarizador ou simplesmente polarizador, que é uma placa de madeira com uma fenda central. Como estratégia didática a ser usada no tratamento desse procedimento, sugere-se ao professor que não apresente nenhuma explicação prévia de forma expositiva sobre o que se pretende discutir sem que antes os alunos realizem atividades práticas. Dessa forma, eles se sentem mais motivados por participarem ativamente no processo de construção do conhecimento. As dimensões recomendadas para a placa de madeira usada como polarizador são 25 *cm* de largura, 50 *cm* de comprimento. A fenda deverá ter 40 *cm* de comprimento e a largura exatamente igual ao diâmetro da corda que for usada para a realização das atividades práticas, que pode ser a mesma usada na atividade 1. A direção da fenda define a direção de polarização linear da onda transmitida pelo polarizador. Para essas próximas atividades, serão necessários dois polarizadores.

Atividade 3

Mantenha uma corda esticada com uma extremidade fixa em um ponto da sala de aula e a outra extremidade na mão de um aluno. A corda deve passar pela fenda de um polarizador que será mantido fixo por um outro aluno em uma posição ortogonal à corda. Dadas essas condições, peça ao aluno que segura a corda que realize os seguintes procedimentos:

- a) Gerar onda linearmente polarizada, oscilando a extremidade da corda na direção **paralela** à direção da fenda.
- b) Gerar onda linearmente polarizada, oscilando a extremidade da corda na direção **perpendicular** à direção da fenda.
- c) Gerar onda circularmente polarizada.

Perguntas

- 1) Em cada situação descrita nessa atividade, a onda continua a se propagar ao encontrar o polarizador?
- 2) Há mudança no estado de polarização da onda ao encontrar o polarizador em cada situação?
- 3) Como se comportam as ondas antes e depois de encontrarem o polarizador? Faça representações gráficas (desenhos) em uma folha.

Atividade 4

Mantenha a corda esticada com uma extremidade fixa em um ponto da sala de aula e a outra extremidade na mão de um aluno. A corda deve passar pelas fendas de dois polarizadores que serão mantidos em posições ortogonais à corda e a uma distância de aproximadamente dois metros um do outro. Nesta atividade, as fendas deverão estar orientadas **paralelamente** entre si. Dadas essas condições, pedir ao aluno com corda na mão que realize os seguintes procedimentos:

- a) Gerar onda linearmente polarizada, oscilando a extremidade da corda na mesma direção das fendas dos polarizadores.
- b) Gerar onda circularmente polarizada.

Pergunta

Em cada uma das duas situações, o segundo polarizador causa alguma modificação no estado de polarização da onda que deixa o primeiro polarizador? Em caso afirmativo, em qual delas?

Atividade 5

Mantenha a corda esticada com uma extremidade fixa em um ponto da sala de aula e a outra extremidade na mão de um aluno. A corda deve passar pelas fendas de dois

polarizadores que serão mantidos em posições ortogonais à corda e a uma distância de aproximadamente dois metros um do outro. Nesta atividade, as fendas deverão estar orientadas **perpendicularmente** entre si. Dadas essas condições, pedir ao aluno com corda na mão que realize os seguintes procedimentos:

- a) Gerar onda linearmente polarizada, oscilando a extremidade da corda na mesma direção que a fenda do primeiro polarizador.
- b) Gerar onda circularmente polarizada.

Pergunta

Em cada uma das duas situações, o segundo polarizador causa alguma modificação no estado de polarização da onda que deixa o primeiro polarizador? Em caso afirmativo, em qual delas?

2.3 Questionário da primeira aula

1. Explique, sucintamente, o que é uma onda mecânica transversal e o que é uma onda mecânica longitudinal. Dê dois exemplos de seu cotidiano de uma onda transversal e de uma onda longitudinal.
2. Faça o seguinte experimento: analise a propagação de um pulso longitudinal ao longo da mola de brinquedo descrita na atividade 2 e estime a velocidade de propagação desse pulso. Repita o experimento com a mola mais esticada. O que acontece com a velocidade de propagação do pulso nesse caso, aumenta, diminui ou permanece a mesma? Você saberia explicar qualitativamente o resultado observado experimentalmente?
3. Considere as seguintes afirmativas:
 - I - em uma mola de brinquedo, como a descrita na atividade 2, só é possível a propagação de ondas longitudinais;
 - II - as ondas sonoras emitidas por um violão são transversais, pois as ondas nas cordas do violão são transversais;
 - III - nas ondas mecânicas longitudinais, a velocidade de propagação da onda e a velocidade dos pontos do meio são iguais, pois em tais ondas os movimentos dos pontos do meio ocorrem na direção de propagação da onda;Marque a alternativa correta.

- a) Somente I é verdadeira.
b) Somente II é verdadeira.
c) Somente III é verdadeira.
d) Todas são verdadeiras.
e) Todas são falsas.
4. Considere um pulso se propagando ao longo de uma corda vibrante tensa e muito longa. Explique a diferença entre velocidade de propagação e a velocidade de um ponto da corda vibrante à medida que o pulso passa por esse ponto.
5. Considere um pulso triangular simétrico, de extensão ℓ e altura máxima h , se propagando ao longo de uma corda muito longa com velocidade de propagação v . Suponha que, no instante t_1 , o pulso atinja o ponto P da corda e que, no instante t_2 , esse ponto atinja a altura máxima h em relação à posição horizontal de equilíbrio da corda. Durante o intervalo de tempo entre t_1 e t_2 , o módulo da velocidade do ponto P , denotado por u , foi
- a) $u = \frac{2h}{\ell}v$.
b) $u = \frac{h}{\ell v}$
c) $u = \frac{h}{2\ell}v$
d) $u = \frac{\ell}{h}v$
e) $u = \frac{\ell}{2h}v$
6. Considere as seguintes afirmativas:
- I - Não é possível mudar o estado de polarização circular de uma onda que se propaga em uma corda vibrante para o estado de polarização linear, pois tais polarizações são independentes entre si;
- II - Uma onda com polarização circular pode ser obtida a partir de 2 ondas com polarizações lineares superpostas apropriadamente;
- III - Se quisermos transformar uma onda linearmente polarizada em outra, também linearmente polarizada, mas com direção de polarização perpendicular à inicial usando polarizadores como os discutidos nas atividades anteriores, precisaremos de, no mínimo, 2 polarizadores.
- Marque a alternativa correta.
- a) Somente I é falsa.
b) Somente II é verdadeira.
c) Somente III é falsa.

- d) Todas são verdadeiras.
- e) Todas são falsas.

3 2ª aula: ondas eletromagnéticas e polarização

Motivações e objetivos

Nesta segunda aula, esperamos familiarizar o aluno com as propriedades básicas sobre uma onda eletromagnética, como, por exemplo, a sua natureza transversal. Com isso, queremos que ele perceba a propriedade de polarização nessas ondas. Isso será feito com o auxílio de experimentos simples. Será fundamental, nessa aula, entender como construir um polarizador de uma onda eletromagnética. Serão discutidos sucintamente alguns métodos de polarização da luz. Entender bem os conceitos envolvidos no estudo da polarização da luz será fundamental para preparar o aluno para uma boa compreensão do assunto a ser tratado na próxima aula, sobre efeito Faraday.

3.1 Ondas eletromagnéticas

Nesta seção, o professor deverá apresentar aos alunos as características gerais das ondas eletromagnéticas, destacando a sua natureza transversal.

Do ponto de vista da física clássica, as ondas eletromagnéticas têm origem no movimento acelerado de partículas carregadas eletricamente e, como qualquer outro fenômeno de ordem eletromagnética, obedecem às chamadas equações de Maxwell. Do ponto de vista da física quântica, tais ondas podem ser geradas a partir do decaimento de um átomo ou molécula de um estado excitado para um estado de mais baixa energia, como por exemplo o seu estado fundamental. No entanto, nosso objetivo aqui não é estudar a origem das ondas eletromagnéticas, mas sim discutir algumas de suas propriedades, em particular, seus estados de polarização.

Os sinais que formam esse tipo de onda, ou seja, os sinais eletromagnéticos, são caracterizados por oscilações dos campos elétrico e magnético presentes na região do espaço onde esses sinais se propagam. Uma das características mais marcantes das ondas eletromagnéticas é que tais ondas se propagam mesmo no vácuo, isto é, em regiões do espaço desprovidas de meios materiais. Obviamente as ondas eletromagnéticas também se propagam em meios materiais, como o vidro, a água, etc. Além disso, as condições impostas pelas equações de Maxwell para a propagação de uma onda eletromagnética no vácuo, no ar, no vidro ou em qualquer outro meio transparente, estabelecem que as oscilações dos campos elétrico e magnético ocorrem em direções perpendiculares entre si. Essas mesmas condições estabelecem ainda que o plano onde ocorrem as oscilações dos campos eletromagnéticos é perpendicular à direção de propagação da onda e de tal modo que \mathbf{B}

tem a direção e sentido de $\mathbf{k} \times \mathbf{E}$, onde \mathbf{k} é o vetor de propagação, com todos os vetores em um mesmo ponto considerado. Por exemplo, se o campo elétrico tem a direção e o sentido do vetor unitário $\hat{\mathbf{x}}$ da base de um sistema de coordenadas cartesianas, o campo magnético tem a direção e o sentido do vetor $\hat{\mathbf{y}}$, então a propagação da onda ocorre na direção e sentido de $\hat{\mathbf{z}}$. Ou seja, uma onda eletromagnética que se propaga no vácuo, no ar, no vidro, etc, é transversal. A figura 8 ilustra as características fundamentais de uma onda eletromagnética propagante no vácuo.

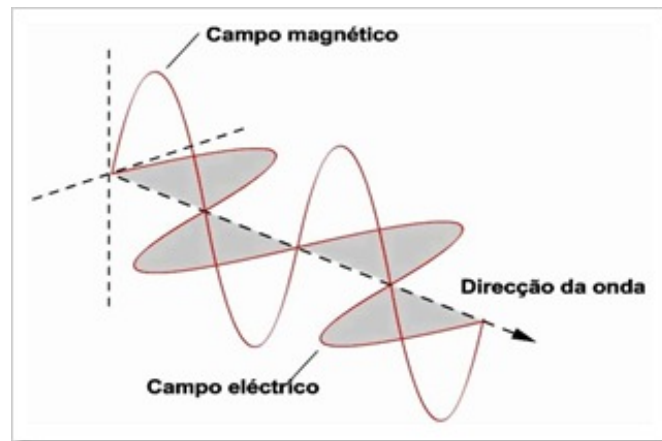


Figura 8:

Representação instantânea de uma onda eletromagnética plana e monocromática.

3.2 Polarização de ondas eletromagnéticas

Nesta seção, o professor inicialmente deverá expor o conceito de polarização de ondas eletromagnéticas e, em seguida, discutir os métodos de polarização através de atividades experimentais simples.

Como as ondas eletromagnéticas possuem natureza transversal, então a elas também se atribui a propriedade da polarização. Por definição, a polarização é dada pela direção de oscilação do campo elétrico da onda. Dessa forma, a onda da figura 8 tem polarização linear, já que seu campo elétrico oscila ao longo de uma direção fixa do espaço. No entanto, as ondas produzidas pela maioria das fontes de que dispomos não apresentam polarização definida. Essas fontes são constituídas por um número consideravelmente alto de partículas carregadas que oscilam em direções arbitrárias e durante intervalos de tempo arbitrários, emitindo ondas com polarizações distribuídas aleatoriamente. A superposição das ondas emitidas por todas as partículas dá lugar a uma onda que não apresenta polarização definida. Ondas com essas características são produzidas, por exemplo, pelo sol, por um laser ou pela lâmpada de uma lanterna, e podem se polarizar através de alguns métodos que discutiremos a seguir.

Para discutir os métodos de polarização de ondas naturais (que não apresentam polarização definida), recomenda-se ao professor que o faça, inicialmente, através de atividades

práticas, onde a participação do aluno tenha um papel de destaque no processo de ensino-aprendizagem. Por razão de ordem didática, o primeiro método que deve ser tratado é o de polarização por absorção. Portanto, as duas atividades a seguir abordam esse tema.

Não é demais prevenir os alunos que fontes de luz intensa, como o laser, ao serem manuseadas nunca devem ser direcionadas aos olhos de qualquer um dos presentes.

Atividade 1

Entregar aos alunos uma fonte de luz (laser vermelho) e um filtro polarizador de luz (polaróide) e pedir que realizem os seguintes procedimentos:

- a) Fazer a luz emitida pela fonte incidir diretamente sobre um anteparo; que pode ser uma parede branca.
- b) Agora, com a luz incidindo sobre o anteparo, posicionar o filtro polarizador ortogonalmente à direção de propagação, de modo que a luz o atravesse.
- c) Girar o filtro polarizador.

Perguntas

- 1) Houve mudança na intensidade luminosa ao fazer a luz atravessar o filtro?
- 2) Houve mudança na intensidade luminosa ao girar o filtro polarizador?

Atividade 2

Entregue aos alunos outro filtro polarizador que também deve ser posicionado ortogonalmente à direção de propagação da onda luminosa e de modo que a luz o atravesse. Em seguida, peça aos alunos para realizarem os seguintes procedimentos.

- a) Com o primeiro polarizador (aquele mais perto da fonte de luz) fixo, girar o segundo. Com isso o aluno notará que a intensidade luminosa no anteparo varia conforme o segundo polarizador muda de orientação.
- b) Com o primeiro polarizador fixo, girar o segundo até a posição em que nenhuma (ou a mínima) intensidade luminosa chegue ao anteparo.
- c) Com o primeiro polarizador fixo, girar o segundo até a posição em que a máxima intensidade luminosa chegue ao anteparo.

OBS.: Os alunos devem marcar as posições referidas nos itens **b** e **c** para efeitos de comparação.

Pergunta

1) Qual foi a variação angular sofrida pelo segundo filtro polarizador ao passar da orientação referida no item **b** para a orientação do item **c**?

Durante a realização dessas atividades, o professor deve encorajar os alunos a formularem suas próprias justificativas para os efeitos observados. Depois de finalizadas essas atividades é recomendável reservar um intervalo de cinco a dez minutos da aula para os alunos trocarem idéias sobre as possíveis justificativas. Em seguida, finalmente, o professor poderá explicar o funcionamento do filtro polarizador e apresentar o conceito de polarização por absorção. Fica como sugestão ao professor a leitura desse assunto nos livros do Halliday [2] e Tipler [3]. Concluída a discussão sobre polarização por absorção, o professor poderá agora propor uma nova atividade onde será tratada a polarização por espalhamento.

Atividade 3

Encha um recipiente transparente (pode ser um copo, por exemplo) com água e misture um pouco de leite em pó. Em seguida, faça incidir sobre esse copo a luz proveniente de uma lanterna que se propaga horizontalmente até atingir o copo. Peça, então, aos alunos que sigam o seguinte procedimento.

- a) Posicionar um filtro polarizador do outro lado do copo, ortogonalmente à direção de emissão da luz da lanterna. Depois, girar o polarizador em torno do seu próprio eixo de simetria, isto é, o eixo que passa pelo seu centro e é perpendicular ao plano do polaroide.
- b) Mover o polarizador de 90 graus em torno do eixo vertical que passa pelo centro do copo, de modo que a luz que atinge o polarizador se propague perpendicularmente em relação à luz que atinge o copo. Girar, agora, o polarizador em torno de seu próprio eixo de simetria.
- c) Posicionar o polarizador sobre o copo de modo que o seu eixo de simetria coincida com o eixo de simetria (vertical) do copo. Orientar o polarizador de modo que ele fique em um plano horizontal. Feito isso, girar o polarizador em torno do seu eixo de simetria.

Perguntas

- 1) Há mudança na intensidade de luz que atravessa o filtro polarizador no item **a** quando ele é girado em torno do seu eixo?
- 2) Há mudança na intensidade de luz que atravessa o filtro polarizador no item **b** quando ele é girado em torno do seu eixo?

- 3) Há mudança na intensidade de luz que atravessa o filtro polarizador no item **c** quando ele é girado em torno do seu eixo?
- 4) Em cada uma das situações dos itens **a**, **b** e **c** a luz que atravessa o filtro polarizador encontra-se polarizada? Em qual ou em quais?

Com a realização desta atividade, e após alguns minutos de reflexão e troca de idéias por parte dos alunos sobre o que observaram, o professor poderá então apresentar a explicação conceitualmente bem fundamentada. Ele deverá informar que as partículas de leite na solução se comportam como pequenos dipolos elétricos que oscilam em consequência de estarem submetidos ao campo elétrico da onda luminosa incidente; e dipolos elétricos oscilantes emitem radiação. Em outras palavras, essas partículas de leite espalham a luz em diversas direções. Conhecendo-se as características da emissão de radiação de um dipolo elétrico oscilante, pode-se compreender qualitativamente o efeito de polarização observado nesse experimento. Por exemplo, como um dipolo elétrico oscilante não emite radiação ao longo da direção de oscilação do dipolo, a luz observada na situação descrita no item (**a**) estará linearmente polarizada, com polarização vertical. Novamente, a leitura do livro do Tipler [3] sobre esse assunto é recomendada ao professor para uma compreensão mais completa do método de polarização por espalhamento.

Ao final da discussão sobre este método, a fim de despertar mais interesse dos alunos pelo assunto, o professor poderá mencionar que a luz proveniente do sol sofre espalhamento na atmosfera e se polariza por um motivo análogo ao descrito anteriormente, o que pode ser observado com um polarizador. O professor pode comentar nesse momento que, embora os olhos dos seres humanos não sejam capazes de distinguir luz polarizada de luz não polarizadas, alguns animais têm essa capacidade. De fato, algumas espécies de formigas utilizam a polarização parcial da luz solar espalhada na atmosfera para se orientarem. Um último método a ser discutido nessa aula é o de polarização por reflexão e a próxima atividade trata dele.

Atividade 4

Apoiar horizontalmente uma pequena placa de vidro pirex (com dimensões de 10cm por 10cm por 1cm no máximo) sobre uma mesa e pedir aos alunos que façam os seguintes procedimentos:

- a) Fazer a luz emitida por um laser incidir sobre a placa formando um ângulo não nulo com a reta normal à superfície.
- b) Posicionar um polarizador, no caminho da luz refletida, ortogonalmente à trajetória de propagação e girar o polarizador em torno do seu eixo.

c) Repetir os procedimentos dos itens **a** e **b** para ângulos diferentes de incidência da luz do laser sobre a placa.

Perguntas

- 1) Para cada ângulo de incidência da luz sobre a placa de vidro, ao girar o polarizador a intensidade de luz refletida que o atravessa sofre variação?
- 2) O ângulo de incidência da luz do laser sobre a placa interfere no resultado observado para a variação de intensidade da luz refletida que atravessa o polarizador ao girá-lo? Isto é, a variação de intensidade da luz refletida que atravessa o polarizador é maior ou menor dependendo do ângulo de incidência da luz do laser?

Após a realização da atividade 4, o professor deverá então discutir com os alunos o conceito de polarização por reflexão, onde os resultados observados na atividade serão formalmente compreendidos. Durante a discussão haverá a oportunidade de o professor levar ao conhecimento dos alunos o ângulo de Brewster. Assim que esse tema for discutido, é recomendável voltar à atividade para verificar que, quando o ângulo de incidência da luz do laser sobre a placa de vidro for aquele cuja tangente é igual ao índice de refração do vidro, então a luz refletida terá uma polarização linear muito bem definida, o que pode ser observado pela ausência de luz refletida para uma única posição do polarizador quando ele é girado em torno do seu eixo.

3.3 Questionário da segunda aula

1. Explique, resumidamente, o que é uma onda eletromagnética e o que significa dizer que uma onda eletromagnética é transversal.
2. Considere uma onda eletromagnética plana e monocromática se propagando no vácuo na direção e sentido do vetor unitário $(\hat{x} + \hat{y})/\sqrt{2}$. Suponha, ainda, que essa onda esteja linearmente polarizada e com o seu campo magnético oscilando na direção do eixo Oz . Faça um desenho e, nele, represente por meio de segmentos orientados os campos elétrico e magnético dessa onda, assim como o vetor de propagação da mesma. Naturalmente, supondo que os campos não são nulos no ponto e no instante escolhidos. Em sua figura, não se esqueça de desenhar os eixos cartesianos.
3. Cite três métodos de polarização da luz e descreva brevemente como cada um deles ocorre.

4. Na atividade 1, o que se pode afirmar sobre o estado de polarização do feixe de luz antes dele atingir o polarizador?
5. Na atividade 2, o que se pode concluir sobre o estado de polarização do feixe de luz depois que ele atravessa o primeiro polarizador?
6. Considere uma onda luminosa monocromática e linearmente polarizada que se propaga horizontalmente e que tem seu campo elétrico oscilando verticalmente. Essa onda incide perpendicularmente sobre um polarizador com eixo de transmissão orientado verticalmente. Após atravessar esse polarizador, essa onda incide perpendicularmente em um segundo polarizador, mas agora com eixo de transmissão orientado horizontalmente.
 - a) A intensidade luminosa dessa onda aumenta, diminui ou permanece a mesma depois que ela atravessa o primeiro polarizador? E ao atravessar o segundo polarizador?
 - b) Descreva o estado de polarização dessa onda no trecho entre os polarizadores.
 - c) Responda aos dois itens anteriores, mas agora supondo que o campo elétrico da onda incidente oscile obliquamente, formando um ângulo de 45° com a vertical.
7. Considere, novamente, a situação descrita na questão anterior, mas supondo agora que a onda incidente seja uma onda plana monocromática com polarização circular.
 - a) A intensidade luminosa dessa onda aumenta, diminui ou permanece a mesma depois que ela atravessa o primeiro polarizador? E ao atravessar o segundo polarizador?
 - b) Descreva os estados de polarização dessa onda no trecho entre os polarizadores e depois que ela atravessa o segundo polarizador (caso haja propagação de onda nesse trecho).
 - c) O que muda nas suas respostas anteriores caso os dois polarizadores sejam trocados de posição, mas com suas orientações dos eixos de transmissão mantidas inalteradas?
8. Considere, novamente, a situação descrita no último problema, ou seja, uma onda luminosa plana, monocromática e circularmente polarizada que atravessa perpendicularmente os polarizadores 1 e 2, com orientações dos eixos de transmissão vertical e horizontal, respectivamente. Suponha, agora, que um terceiro polarizador seja inserido entre os outros dois e que esse polarizador a sua orientação de seu eixo de transmissão formando um ângulo de 45° com os dos outros dois.
 - a) Haverá intensidade luminosa após essa onda atravessar o último polarizador (polarizador 2)? Justifique a sua resposta.

- b) Descreva os estados de polarização dessa onda em todos os trechos: entre os polarizadores 1 e 3, entre os polarizadores 3 e 2 e depois que a onda atravessa o polarizador 3.
- c) O que mudaria nas respostas dos itens anteriores caso os polarizadores 1 e 2 fossem trocados de posição, com o polarizador 3 mantido entre eles, mas supondo que todas as orientações dos seus eixos de transmissão permanecessem inalteradas?

4 3ª aula: atividade óptica natural e efeito Faraday

Motivações e objetivos

Nesta última aula, discutiremos inicialmente o fenômeno da atividade óptica natural, que consiste, essencialmente, na rotação do plano de polarização linear de uma onda luminosa monocromática quando ela atravessa certos materiais transparentes com certas propriedades particulares, que ficarão claras no decorrer da aula. Os meios nos quais esse fenômeno ocorre são chamados *meios opticamente ativos*. Em seguida, motivados pelo assunto introduzido, seremos levados a tratar a atividade óptica através do efeito Faraday, no qual a rotação da polarização da onda luminosa ocorre mesmo em meios não opticamente ativos, desde que um campo magnético externo constante seja apropriadamente aplicado.

4.1 Atividade óptica natural

Nesta seção, o professor levará aos alunos o conhecimento sobre o fenômeno de atividade óptica natural, oportunidade em que discutirá o conceito de birrefringência circular e os meios opticamente ativos. Mas, como sempre, antes de qualquer ação expositiva ele deverá propor aos alunos algumas atividades práticas como instrumento de motivação.

Atividade 1

Encher um recipiente transparente com água e fazer a luz (monocromática) emitida por um laser atravessá-lo. Em seguida pedir aos alunos que realizem os seguintes procedimentos:

- a) Posicionar dois polarizadores no caminho da luz. O primeiro antes do recipiente e o segundo depois dele.
- b) Com o primeiro polarizador fixo, girar o eixo de transmissão do segundo até que nenhuma intensidade luminosa (ou a mínima possível) chegue ao anteparo posicionado em sequência no caminho da luz.
- c) Em seguida, ir misturando uma porção de açúcar gradativamente à água do recipiente.

Pergunta

- 1) Houve mudança na intensidade luminosa projetada sobre o anteparo depois que o açúcar foi colocado na água?

Atividade 2

Seguindo os procedimentos da atividade 1, peça aos alunos para:

- a) girar novamente o segundo polarizador até que, mais uma vez, nenhuma intensidade luminosa chegue ao anteparo e medir o ângulo de giro.
- b) adicionar na mesma solução o dobro da quantidade de açúcar inicialmente usada e outra vez girar o segundo polarizador até que nenhuma intensidade luminosa chegue ao anteparo, medindo esse novo ângulo de giro.

OBS.: Se possível, repetir a atividade 1 e o primeiro procedimento da atividade 2 com uma concentração de açúcar em água quatro vezes maior que a usada inicialmente na atividade 1.

Perguntas

- 1) A concentração de açúcar na solução influencia nos valores dos ângulos medidos no experimento?
- 2) É possível estabelecer uma relação de proporção entre a concentração de açúcar e o ângulo medido em cada situação experimentada? Em caso afirmativo, qual é essa relação?
- 3) Com base no que foi observado, que influência a adição de açúcar causa na polarização da onda luminosa no interior da solução?

Estas atividades despertam a curiosidade dos alunos para o fenômeno da atividade óptica natural. Dessa forma, a discussão sobre a justificativa conceitual dos efeitos observados se torna mais agradável aos estudantes. Portanto, logo após a realização dessas atividades, o professor deve levar aos alunos o conhecimento sobre a birrefringência circular e o comportamento de meios opticamente ativos. Para isso, sugere-se ao professor a leitura das seções 5.3 e 5.4 do capítulo 5 do livro de H. Moysés Nussenzveig [5]. É importante destacar que o tratamento matemático apresentado nessas seções não é recomendado em nível médio como objeto de estudo. Sendo assim, em resumo, o professor deve informar ao aluno que a birrefringência circular leva ao desvio do plano de polarização linear da luz e tem origem na natureza quiral da estrutura molecular que forma o meio de propagação; meio este que é conhecido como opticamente ativo em função da sua atividade sobre a polarização da luz propagante. Finalizada a discussão sobre os aspectos fenomenológicos fundamentais da atividade óptica natural, o professor pode agora propor uma nova atividade prática que aborda uma característica da atividade óptica até então não mencionada. O objetivo desta atividade é investigar a relação entre o ângulo de desvio da polarização da onda luminosa e o comprimento percorrido no meio opticamente ativo.

Atividade 3

Encher três recipientes transparentes (de preferência com formatos de paralelepípedo) com água e fazer feixes de luz atravessá-los. É proposto que os três recipientes tenham os comprimentos 10cm , 20cm e 30cm (ou outros valores na mesma proporção) ao longo da direção de propagação da luz. Em seguida, pedir aos alunos que realizem os seguintes procedimentos:

- a) Em cada recipiente, posicionar dois polarizadores no caminho da luz. O primeiro antes do recipiente e o segundo depois dele.
- b) Em cada recipiente, com o primeiro polarizador fixo, girar o eixo de transmissão do segundo até que nenhuma intensidade luminosa (ou a mínima possível) chegue ao anteparo posicionado em sequência no caminho da luz.
- c) Adicionar açúcar nos recipientes de modo que a concentração seja a mesma nos três.
- d) girar novamente o eixo de transmissão do segundo polarizador até que, mais uma vez, nenhuma intensidade luminosa chegue ao anteparo e medir os ângulos de giro em cada um dos três.

Perguntas

- 1) Os ângulos medidos em **d** foram iguais ao comparar os três recipientes?
- 2) Os comprimentos dos recipientes influenciam nos valores dos ângulos medidos no item **d**?
- 3) Os ângulos medidos em **d** e os comprimentos dos recipientes seguem alguma relação de proporção? Em caso afirmativo, qual?

Essas três atividades mostram que o desvio angular no plano de polarização da luz que atravessa o meio opticamente ativo é proporcional à concentração de açúcar (molécula quiral) na solução e ao comprimento do meio, isto é, o desvio é proporcional ao produto dessas duas quantidades. Mas a atividade óptica pode ser realizada ainda em meios não opticamente ativos, como a água pura. Neste caso, a aplicação de um campo magnético externo ao meio confere a ele a capacidade de realizar a birefringência circular, o que no meio opticamente ativo ocorre em função da concentração da substância quiral. Sendo assim, para a atividade óptica induzida por campo magnético, o ângulo de desvio do plano de polarização da luz não é dado em função da concentração de açúcar em solução como visto até aqui, mas em função do campo magnético aplicado. Essa nova atividade óptica, que recebe o nome de efeito Faraday, em homenagem ao cientista que o descobriu, será tratada na seção seguinte.

4.2 Efeito Faraday

Esta seção é destinada à discussão do efeito Faraday. A introdução do assunto deve se dar a partir da realização de uma atividade experimental onde o efeito é observado. Em seguida, o professor deve apresentar uma avaliação teórica do fenômeno.

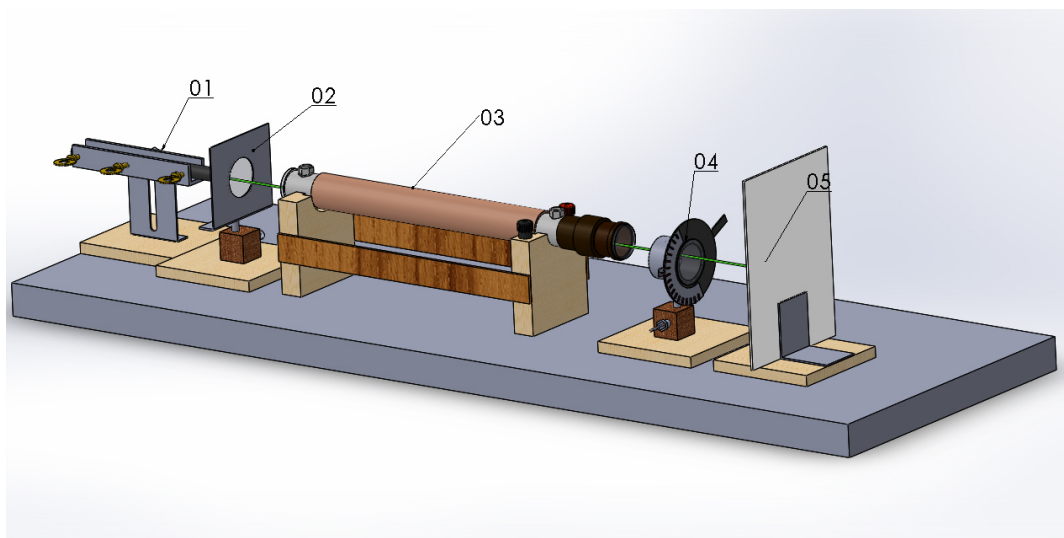
Para a atividade proposta a seguir, o professor deve dispor de uma bobina com 300mm de comprimento cuja base seja um tubo metálico com 27mm de diâmetro e fechado nas extremidades com vidro transparente, de modo que um feixe de luz possa atravessar o seu interior repleto de água.

Atividade 4

Com a bobina contendo água em seu interior, fazer a luz monocromática emitida por um laser atravessá-la. Em seguida, realizar com os alunos os seguintes procedimentos:

- a) Posicionar dois polarizadores no caminho da luz, o primeiro antes da bobina e o segundo, depois dela.
- b) Com a bobina conectada a uma fonte de tensão **desligada** e com o primeiro polarizador fixo, girar o eixo de transmissão do segundo até que nenhuma intensidade luminosa chegue ao anteparo posicionado em sequência no caminho da luz.
- c) Em seguida, **ligar a fonte** e ir aumentando gradualmente a corrente (contínua) na bobina (**até o valor máximo de 6,5 A**).
- d) Se possível, para valores igualmente intervalados do módulo do campo magnético, medir o ângulo que o eixo de transmissão do segundo polarizador precisa ser girado para que a intensidade luminosa no anteparo volte a ser nula. Depois traçar o gráfico das medidas dos ângulos em função dos valores do campo magnético (ou, equivalentemente, em função da corrente elétrica na bobina) e determinar a curva que melhor se ajusta aos pontos, a fim de estabelecer uma relação funcional entre as duas quantidades. **SUGESTÃO:** Usar uma planilha eletrônica.

A figura a seguir ilustra o aparato usado nessa atividade



01. Fonte de luz (laser) e seu suporte; 02. Polarizador fixo e seu suporte; 03. Bobina e seu suporte; 04. Polarizador movel e seu suporte; 05. Anteparo.

Perguntas

- 1) O aumento gradual do campo magnético no interior da bobina, causado pelo aumento na corrente sobre ela, produz que efeito na intensidade de luz sobre o anteparo?
- 2) O aumento do campo magnético no interior da bobina causa alguma mudança na polarização da luz que atravessa o meio?
- 3) O meio se torna opticamente ativo com a aplicação do campo magnético?
- 4) Que relação funcional foi encontrada no item **d** entre o ângulo de desvio da polarização da luz e a intensidade do campo magnético?

Depois da realização do experimento, o professor deverá apresentar a justificativa teórica para os resultados observados. Como o tratamento teórico usual do fenômeno exige um nível de conhecimento matemático que vai além do esperado para alunos do ensino médio, é preciso, então, oferecer uma versão simplificada que seja minimamente acessível a eles. Nesse sentido, uma explicação sugerida para o efeito de rotação do plano de polarização da luz ao atravessar um meio no qual se verifica a birrefringência circular é a seguinte:

Considerando inicialmente duas ondas circularmente polarizadas com rotações opostas de mesma frequência ω , o campo elétrico da dextrógira e o da levógira são dados respectivamente por

$$\mathbf{E}_D = E_0 \cos(kz - \omega t + \delta_D)\hat{\mathbf{x}} + E_0 \sin(kz - \omega t + \delta_D)\hat{\mathbf{y}}, \quad (4.1)$$

$$\mathbf{E}_L = E_0 \cos(kz - \omega t + \delta_L)\hat{\mathbf{x}} - E_0 \sin(kz - \omega t + \delta_L)\hat{\mathbf{y}},$$

onde k é um número de onda no meio de propagação enquanto δ_D e δ_L são constantes de fase, isto é, independentes do tempo mas possíveis funções de z . Definindo as quantidades

$$\theta_D = kz + \delta_D, \quad \theta_L = kz + \delta_L, \quad \Phi_D = \theta_D - \omega t \quad \text{e} \quad \Phi_L = -(\theta_L - \omega t), \quad (4.2)$$

ao substituí-las em (4.1), as expressões para os campos dextrógiro e levógiro ficam

$$\mathbf{E}_D = E_0 \cos(\Phi_D)\hat{\mathbf{x}} + E_0 \sin(\Phi_D)\hat{\mathbf{y}}, \quad (4.3)$$

$$\mathbf{E}_L = E_0 \cos(\Phi_L)\hat{\mathbf{x}} + E_0 \sin(\Phi_L)\hat{\mathbf{y}}.$$

Essas equações indicam que Φ_D e Φ_L são os ângulos que \mathbf{E}_D e \mathbf{E}_L fazem com o eixo x , como mostra a figura 1.

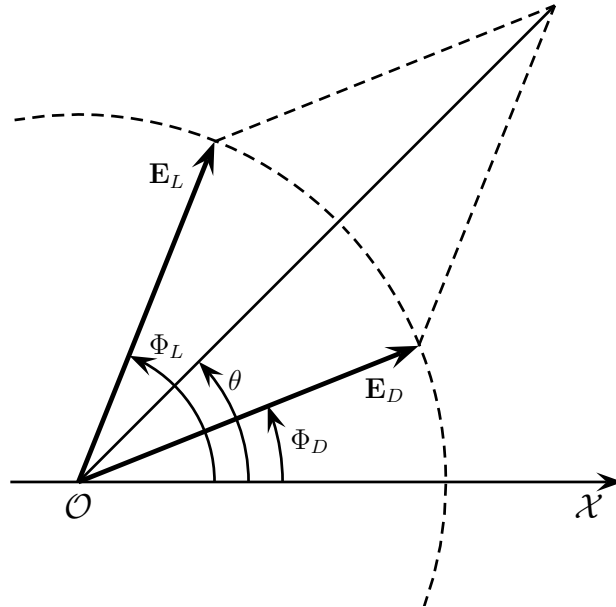


Figura 1. – A resultante de vetores de mesmo módulo está na bissetriz do ângulo entre os vetores: $\Phi_L - \theta = \theta - \Phi_D$

Como as duas ondas têm o mesmo módulo, $|\mathbf{E}_D| = |\mathbf{E}_L| = E_0$, os campos formam ângulos simétricos em relação a superposição deles. Denotando por θ o ângulo que a superposição faz com o eixo x ,

$$\Phi_L - \theta = \theta - \Phi_D, \quad (4.4)$$

isto é,

$$\theta = \frac{\Phi_D + \Phi_L}{2}. \quad (4.5)$$

Usando as definições de Φ_D e Φ_L em (4.2), resulta

$$\theta = \frac{1}{2}(\theta_D - \theta_L). \quad (4.6)$$

Como o ângulo θ não depende do tempo, a superposição das duas ondas com rotações de mesma frequência em sentidos opostos, e com defasagem constante, é uma onda linearmente polarizada com direção na bissetriz do ângulo formado pelas duas ondas superpostas. Naturalmente, a amplitude da onda resultante é o dobro da amplitude das ondas circulares superpostas. Na obtenção desse resultado, também fica claro que é sempre possível escrever uma onda linearmente polarizada como a superposição de duas ondas com rotações de mesma frequência e sentidos opostos, e defasagem constante.

Em um meio opticamente ativo (em que há birrefringência circular), como os índices de refração são diferentes para ondas dextrógiras e levógiras, eles são expressos respectivamente por n_D e n_L . Nesse caso,

$$\theta_D = n_D k_0 z + \delta_D \quad \text{e} \quad \theta_L = n_L k_0 z + \delta_L, \quad (4.7)$$

onde k_0 é o número de onda no vácuo. Tomando $\delta_D = 0$ e $\delta_L = 0$, o que equivale a supor que em $z = 0$ a superposição das ondas opostas encontra-se na direção do eixo x , resulta de (4.6) que

$$\theta = \frac{1}{2}(n_D - n_L)k_0 z \quad (4.8)$$

ou, usando $\delta n = n_L - n_D$ (definição do formalismo geral),

$$\theta = -\frac{\delta n}{2}k_0 z. \quad (4.9)$$

Nesse resultado se vê que o ângulo θ varia em função da coordenada z ao longo da qual a onda se propaga. Portanto, em um meio opticamente ativo, ocorre desvio angular no plano de polarização linear da onda à medida que ela atravessa.

Veja que o resultado 4.9, que também se aplica à atividade óptica natural, está de acordo com o que foi observado na atividade 3, isto é, o ângulo de rotação do plano de polarização da luz é proporcional ao comprimento atravessado no meio opticamente ativo, uma vez que a dependência em z é linear. Quanto ao δn neste mesmo resultado, a atividade 2 mostra, ainda no caso da atividade óptica natural, que a sua origem está na concentração da substância quiral na solução que compõe o meio de propagação, enquanto a atividade 4 mostra, já para o caso do efeito Faraday, que a sua origem está na ação do campo magnético externo sobre o meio. No item **d** da atividade 4, verifica-se que o desvio angular da polarização da luz é diretamente proporcional ao módulo do campo magnético, de modo que a expressão (4.9) pode ser escrito por

$$\theta = V B z, \quad (4.10)$$

onde a constante de proporcionalidade V é conhecida como constante de Verdet, cujo valor depende do comprimento de onda da luz propagante e de propriedades do meio. Portanto, se uma onda luminosa linearmente polarizada sofrer efeito Faraday em um meio de comprimento L , ela deixará este meio com sua polarização linear desviada de $\theta = V B L$, onde V é a constante de Verdet da onda no meio.

4.3 Questionário da terceira aula

1. As afirmativas a seguir se referem, todas, a ondas planas, monocromáticas e que se propagam na mesma direção e sentido.

I - Embora uma onda circularmente polarizada possa ser obtida a partir da superposição de duas ondas linearmente polarizadas, uma onda linearmente polarizada não pode ser obtida pela superposição de duas ondas circularmente polarizadas.

II - A superposição de duas ondas circularmente polarizadas dá origem, necessariamente, a uma onda resultante também circularmente polarizada.

III - A superposição de uma onda circularmente polarizada com uma outra linearmente polarizada pode gerar uma onda resultante linearmente polarizada, mas jamais uma onda resultante circularmente polarizada.

Marque a alternativa correta.

- a) Somente I é verdadeira.
 - b) Somente II é verdadeira.
 - c) Somente III é verdadeira.
 - d) Todas são verdadeiras.
 - e) Todas são falsas.
2. Explique em poucas palavras o que significa dizer que um material é birrefringente?
 3. O que é atividade óptica natural de um meio material?
 4. Que propriedade deve ter um meio material transparente para que seja opticamente ativo? Baseado nessa propriedade do meio, explique sucintamente porque o plano de polarização da onda dentro de um meio opticamente ativo muda quando essa onda o atravessa.
Sugestão: pense nos índices de refração associados à propagação de ondas com polarização circular levógira e com polarização circular dextrógira.
 5. O que é efeito Faraday em ótica?
 6. Que papel o meio sem atividade óptica natural desempenha no efeito Faraday?
 7. O que é constante de Verdet de um meio material?

Bibliografia

- [1] Nussenzveing H M 2002 *Curso de Física Básica* vol.2 - 4 ed (São Paulo: Blucher)
- [2] Resnick R, Halliday D, Krane K S 1996 *Física 4* (Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos)
- [3] Tipler2006 Tipler P A, Mosca G 2006 *Física para Cientistas e Engenheiros. Volume 2: Eletricidade e Magnetismo, Óptica* 5 ed (Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos) (tradução de Fernando Ribeiro da Silva, Mauro Speranza Neto)
- [4] Nussenzveing H M 1997 *Curso de Física Básica* vol.3 - 1 ed (São Paulo: Blucher)
- [5] Nussenzveing H M 1998 *Curso de Física Básica* vol.4 - 1 ed (São Paulo: Blucher)
- [6] Rossi B 1957 *Optics* (Reading, Massachusetts: Addison-Wesley)
- [7] Faraday M 1933 *Faraday's Diary* volume IV (Thomas Martin ed.) (London: George Bell and Sons)