
Polarização e Interferência da Luz

5

META:

Realizar experimentos para verificar o caráter ondulatório da luz.

OBJETIVOS:

Estudar a variação da intensidade da luz que atravessa dois polarizadores em função do ângulo formado pela orientação dos mesmos.

Estudar a polarização da luz por reflexão e determinar o ângulo de Brewster.

Usando variações no padrão de interferência da luz, determinar o comprimento de onda de um laser.

PRÉ-REQUISITOS

Ter as experiências montadas.

5.1 Introdução

Em 1905, Albert Einstein publicou um trabalho para explicar o efeito fotoelétrico mostrando que a luz se comporta como partícula, chamadas fótons. Outras tentativas de explicar o efeito fotoelétrico através da teoria ondulatória da luz fracassaram. Por outro lado, sabemos que a luz pode sofrer interferência, difração e polarização que são fenômenos puramente ondulatórios. A luz é partícula e onda ao mesmo tempo, e este comportamento dual é revelado pelo tipo experimento que fazemos. Nesta aula, vamos estabelecer, pela observação experimental, que a luz se comporta como onda através dos fenômenos de polarização e de interferência.

5.2 Polarização

A onda eletromagnética emitida por um íon individual oscilante é polarizada, isto é, o campo elétrico desta onda transversal é um vetor que é produzido e sempre se propaga contido no plano definido pela direção de vibração do íon e a de propagação da onda - neste caso dita plano-polarizada. Durante a propagação pode acontecer que um agente, como o conjunto de átomos do meio, tenha a capacidade de modificar a direção de vibração deste campo, resultando uma onda classificada como de polarização elíptica ou, particularmente, circular. Nestes casos o vetor campo gira, à medida que se propaga, em torno da direção de propagação.

Por outro lado, o feixe de ondas eletromagnéticas emitido por um conjunto de íons não correlacionados é não polarizada, sendo isto devido à não existência, neste caso, de qualquer dependência da direção de vibração de cada um dos íons em relação aos outros.

Então, todas as direções possíveis de polarização estarão presentes no feixe emitido. Uma lâmpada de incandescência comum é um

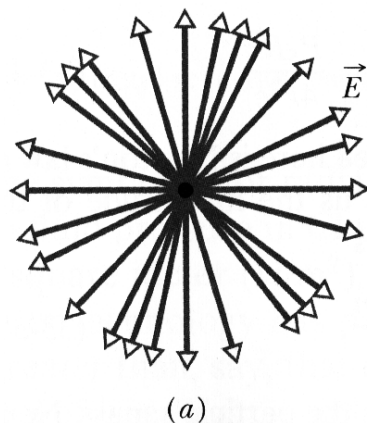


Figura 5.1: A luz não polarizada composta por ondas com campos elétricos de direção aleatória.

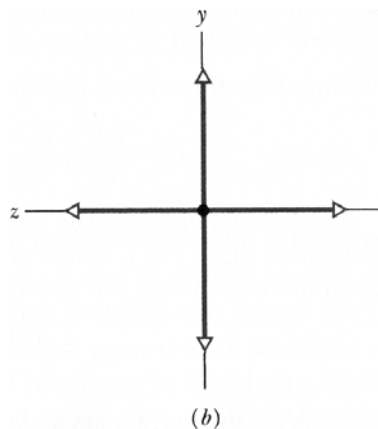


Figura 5.2: Outra forma de representar luz não polarizada, onde a luz é a superposição de duas ondas polarizadas em planos perpendiculares entre si.

exemplo de fonte que produz luz não polarizada. Um laser é um exemplo de luz polarizada.

Polarizada ou não, a produção de radiação eletromagnética por intermédio da vibração de cargas elétricas, como dipolos elétricos oscilantes, pode ocorrer em frequências correspondentes à região óptica do espectro eletromagnético, sendo então capazes de impressionar o olho humano, ou seja, emitem luz. A presente prática explora o fenômeno da polarização usando um feixe de onda eletromagnética, especificamente de luz. Entretanto, a polarizabilidade é inerente a qualquer onda transversal, e de fato é uma de suas características. A luz pode ser polarizada total ou parcialmente,

através dos fenômenos de absorção, reflexão, difusão, dupla-refração, ou uma combinação destes. São explorados nesta prática situações em que a absorção e a reflexão são predominantes.

Entre os cristais que ocorrem na natureza, alguns são altamente anisotrópicos à propagação da luz, no sentido de que podem ser mais transparentes às componentes da radiação que tenha seus vetores de campo elétrico oscilando numa certa direção do que em outra, por exemplo, que lhe seja perpendicular. Esse comportamento é uma função da estrutura do cristal, que é diferente segundo direções mutuamente ortogonais, numa delas sendo facilitada a absorção de energia da onda, e não na outra, na qual é facilitada a transmissão - direção fácil. A absorção se processa pelo fato de que, forçados pelo campo elétrico da onda, os íons do cristal, por ressonância, são induzidos a oscilar. Portanto, a anisotropia em questão está ligada às diferentes frequências naturais de oscilação do cristal segundo aquelas direções.

Os cristais que apresentam a propriedade de polarizar a luz são denominados dicróicos. Com forte dicroísmo pode-se citar, como exemplos, a turmalina, que é um cristal natural, e o polaróide, este um material artificial com a vantagem do baixo custo. O processo de obtenção do polaróide foi inventado por Edwin H. Land em 1932. Quando luz não polarizada atravessa um cristal deste tipo, ou mesmo um polaróide, estarão ausentes do feixe emergente mais ou menos das componentes do feixe original cujas oscilações de campo elétrico estejam orientadas ao longo da direção de maior absorção. Desse modo, o feixe emergente estará polarizado, numa direção perpendicular àquela em que houve absorção, portanto, na direção fácil. A energia absorvida no percurso, é verdade, será em

grande parte re-emitada, mas não somente na direção original, mas em todas as direções, exceto à do eixo de oscilação de cada carga, o que justifica o decréscimo de energia do feixe resultante na direção original de propagação ¹.

Caso este mesmo feixe, então polarizado, incida sobre outra amostra de material semelhante, não é difícil prever que, após atravessá-lo, terá uma intensidade que será função do ângulo entre o vetor campo elétrico da luz incidente e a direção fácil desta nova amostra do cristal. Sendo E_0 o módulo do vetor campo elétrico da onda incidente e θ o ângulo entre este vetor e a direção fácil, a componente efetiva de campo que atravessará o cristal será $E_0 \cos \theta$. Portanto, como a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude, tem-se que a intensidade do feixe emergente, I , será:

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (5.36)$$

Outra forma de obter a polarização total ou parcial de um feixe luminoso é através da sua reflexão. De um feixe não polarizado, supondo suas múltiplas polarizações decompostas em apenas duas, uma com o campo elétrico paralelo e a outra com ele perpendicular à superfície refletora, para qualquer ângulo de incidência o feixe refletido terá mais componentes do tipo paralelo. Para cada ângulo de incidência esta proporção é função deste ângulo e do índice de refração relativo dos dois meios ².

Para meios transparentes, um deles com índice de refração n_1 , no qual propaga o feixe incidente, e outro de índice de refração n_2 , que contém o refratado, existe um ângulo de incidência, denominado ângulo de Brewster, para o qual o feixe refletido é totalmente

¹Observe-se que o fenômeno da polarização não exclui o da refração.

²Lembre-se que o índice de refração depende do comprimento de onda.

polarizado na direção paralela à superfície refletora, dado por:

$$\tan \theta = \frac{n_2}{n_1} = n_{21} \quad (5.37)$$

5.2.1 Material

Fonte de luz e sua alimentação, Fendas diversas, Polarizadores, Anteparo, Semicilindro de acrílico e disco graduado, Fotodetector, Banco óptico. Multímetro digital Suportes para banco óptico.

O fotodetector é um dispositivo eletrônico que muda a sua resistência a medida que a intensidade de luz que incide sobre ele muda. A intensidade de luz em função da resistência é dada por $I = bR^a$, onde a e b são constantes. (Dado do fabricante)

5.2.2 Procedimento Experimental

1ª parte: Intensidade da luz em função do ângulo entre os polarizadores

1. Instale a fonte de luz e a lâmina com orifício circular na frente da fonte de luz.
2. Instale dois polarizadores entre a fonte de luz e o anteparo, e a lâmina com orifício circular na fonte de luz.
3. Fixe uma certa orientação angular para um polarizador e varie a orientação do outro (analisador). Observe a intensidade da luz sobre o anteparo. Repita o procedimento invertendo os polarizadores.
4. Retire o anteparo, instale o fotodetector e conecte-o ao multímetro em escala de Ohm Ω .
5. Repita a primeira parte do item 3 anotando o valor da resistência medida no multímetro em função do ângulo entre o polarizador

e o analisador. Mude o ângulo do primeiro polarizador e repita as medidas.

R									
θ									
R									
θ									

6. Inverta os polarizadores e repita o item anterior.

R									
θ									
R									
θ									

7. Retire um polarizador e com o fotodetector em frente ao orifício circular, meça o valor da resistência.

8. Agora retire o outro polarizador e com o fotodetector em frente ao orifício circular, meça o valor da resistência.

2ª parte: Polarização da Luz por Reflexão

8. Retire os polarizadores e instale o disco graduado com o semicilindro de acrílico no centro e instale a lâmina com fenda retangular na fonte de luz.

9. Incida a luz sobre a superfície plana do semicilindro de acrílico com um certo ângulo, e use um analisador para verificar o estado de polarização do feixe refletido.

10. Varie o ângulo de incidência e encontre o ângulo θ_b para o qual

o feixe refletido apresenta máxima polarização - ângulo de Brewster.

11. Verifique quanto vale a soma dos ângulos de incidência e de refração no caso da incidência de Brewster.
12. Discuta qual deve ser o plano de polarização da luz refletida no ângulo de Brewster e realize as experimentações necessárias para testar as hipóteses levantadas.
13. Polarize a luz incidente num plano paralelo à superfície refletora e analise a refletida no ângulo de Brewster. Faça o mesmo usando luz polarizada perpendicularmente.

5.2.3 Análise dos dados

1. Faça um gráfico de R em função do $\cos^2(\theta)$
2. Linearize o gráfico de R em função do $\cos^2(\theta)$.
3. Faça o ajuste da reta pelo método dos mínimos quadrados. Qual a interpretação física dos coeficientes?
4. Explique com suas palavras as observações feitas nos procedimentos 3 e 5.
5. Usando o valor da resistência medida para a luz não polarizada, calcule e compare o valor da intensidade da luz prevista pela teoria.
6. Use a lei de Snell e a relação obtida no item 11 para determinar a expressão (5.37).
7. Enumere as hipóteses levantadas no procedimento 12 e justifique sua conclusão com base nas observações, inclusive do procedimento 13.
8. Se o feixe refletido na interface de separação de dois meios trans-

parentes tem polarização máxima no ângulo de Brewster, o que se pode concluir sobre a polarização do feixe refratado? Argumente para explicar sua resposta.

5.3 Interferência

Para entender a interferência é fundamental saber que a luz é um fenômeno ondulatório e que o efeito de vários trens de onda que chegam em um ponto depende das fases das ondas e de suas amplitudes. As ondas luminosas emitidas pelas fontes comumente usadas em laboratório consistem de uma mistura de frequências ou comprimentos de ondas diferentes.

Em qualquer ponto onde dois trens de onda se cruzem diz-se que eles interferem. Isto quer dizer que nesse ponto o efeito total é uma combinação dos efeitos que seriam produzidos por cada trem de onda em particular. O princípio da superposição estabelece que a perturbação resultante em qualquer ponto, em qualquer instante, pode ser obtido adicionando-se as perturbações instantâneas que ali seriam produzidas pelos trens de onda individuais, como se cada um estivesse presente sozinho. Este princípio vale somente para pequenos deslocamentos, tais como os produzidos por fontes comuns de laboratório. Para produção de efeitos observáveis de interferência, é necessário que existam duas fontes que emitam luzes aproximadamente monocromáticas e que estas sejam coerentes, ou seja, mantenham uma diferença de fase constante. Uma maneira prática de obter ondas com diferença de fase constante é originá-las de uma mesma fonte como visto na (**Fig. 5.3**).

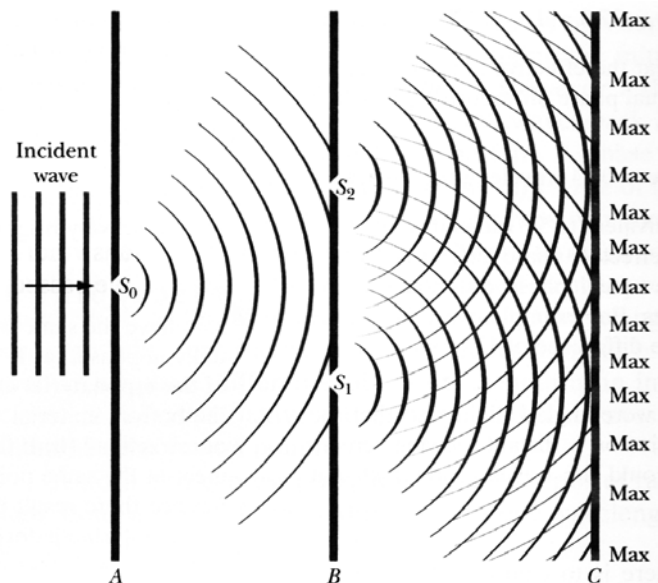


Figura 5.3:

Se for colocada uma fonte monocromática no ponto S_0 e as distâncias forem convenientes, então serão vistas no anteparo em C na (**Fig. 5.3**) imagens da fenda, alternadamente claras (Max) e escuras. Se for usada luz branca as imagens serão coloridas. Esta experiência foi realizada pela primeira vez por Thomas Young que interpretou corretamente serem as imagens brilhantes e escuras devidas a interferência, estabelecendo assim que a luz se propaga segundo um modelo ondulatório.

A idéia fundamental dessa experiência é produzir e estudar a interferência luminosa. Para isso utilizaremos um arranjo experimental conhecido como interferômetro de Michelson. A (**Fig. 5.4**) representa esquematicamente um interferômetro de Michelson. Um feixe de luz proveniente da fonte L atinge o espelho semi-refletivo S o qual deixa passar metade da intensidade luminosa e

reflete a outra metade. Devido a inclinação de S ser de 45° em relação à direção do feixe incidente, o raio refletido dirige-se para o espelho $E1$ onde é mais uma vez refletido. O feixe transmitido é refletido no espelho $E2$. Quando estes feixes refletidos pelos espelhos $E1$ e $E2$ atingem novamente S , parte é refletida e parte é transmitida de maneira que parte deles poderá atingir o anteparo A . A diferença entre os percursos dos dois feixes que atingem o espelho $E1$ e que atingem o espelho $E2$ produz no anteparo A um padrão de interferência.

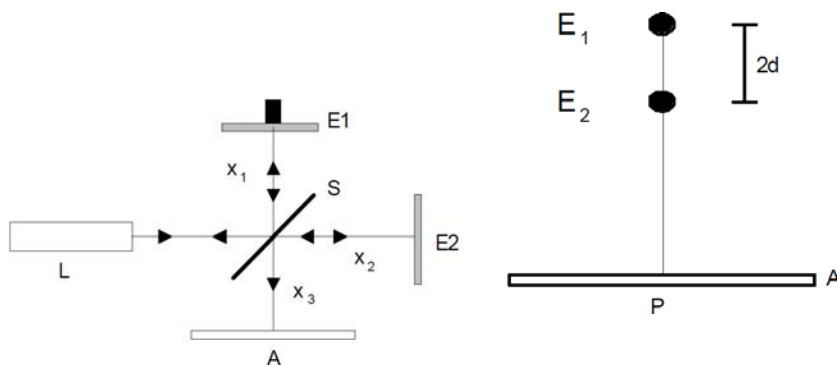


Figura 5.4: Desenho esquemático de um interferômetro de Michelson. L é a fonte de luz laser, $E1$ o espelho móvel, $E2$ o espelho "fixo", A um anteparo e S é um espelho semi-transparente.

Figura 5.5: Esquema das "fontes virtuais" coerentes que representam os dois espelhos e dos feixes luminosos provenientes destas duas fontes e atingem o anteparo A num ponto P .

A exemplo do arranjo de Young, os dois espelhos $E1$ e $E2$ funcionam como duas fontes de luz coerentes que produzirão uma figura de interferência no anteparo. Do ponto de vista do anteparo, o arranjo todo poderia ser substituído por duas fontes coerentes virtuais colocadas perpendicularmente ao espelho (vide **Fig. 5.5**).

Utilizando as distâncias convencionadas na (**Fig. 5.5**), podemos notar que a diferença d de distâncias entre os dois espelhos e o espelho S é dada por:

$$d = x_1 - x_2$$

e os percursos q_1 e q_2 dos dois feixes luminosos relativos a E1 e E2 são dados por:

$$q_1 = 2x_1 + x_3 \quad q_2 = 2x_2 + x_3$$

A diferença Δq entre os dois caminhos é, portanto:

$$\Delta q = q_1 - q_2 = 2x_1 - 2x_2 = 2d$$

o que justifica o valor representado na (**Fig. 5.5**).

Devemos esperar que a interferência seja destrutiva no anteparo quando esta distância $2d$ for igual a um múltiplo ímpar do comprimento de onda da luz do feixe, produzindo uma região de intensidade mínima. Por outro lado, toda vez que a distância for um múltiplo par do comprimento de onda, a interferência será construtiva e a intensidade de luz nesta região será máxima. Se a distância $2d$ entre os espelhos variar, devemos esperar que, num ponto fixo do anteparo, a intensidade de luz deva variar também. Neste ponto teremos ora uma região clara, ora uma região escura. Suponha agora que, partindo de uma situação na qual o ponto está no escuro, o espelho seja deslocado de uma determinada distância d ao mesmo tempo que se conta o número de vezes n que o ponto P passa de escuro para claro e depois escuro novamente (número de "períodos"). Cada ciclo escuro-claro-escuro ocorrerá quando a diferença entre os caminhos dos dois feixes coincidir com um

comprimento de onda da luz utilizada. Podemos escrever portanto que:

$$2\Delta d = n\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{2\Delta d}{n}$$

Desse modo, variando a distancia entre o espelho E1 e S, podemos verificar a variação do padrão de interferência mostrado no anteparo A e relacionar o comprimento de onda da luz em estudo com as distâncias entre os espelhos. No arranjo de Michelson o espelho móvel é controlado por um parafuso micrométrico. O interferômetro de Michelson pode ser utilizado para medidas de grande precisão de comprimentos ou variações de comprimentos.

5.3.1 Material

Laser, Interferômetro de Michelson, Lentes, Anteparo.

5.3.2 Procedimento Experimental

1. Ajuste o feixe de laser de tal forma que a luz incida aproximadamente sobre o centro do espelho semi-prateado (central) do interferômetro.
2. Mude a posição do espelho ajustável de modo que os dois pontos luminosos que chegam ao anteparo coincidam. Isso é feito ajustando os dois parafusos.
3. Coloque a(s) lente(s) entre o laser e o interferômetro de modo que o feixe incidente seja alargado e que apareça no anteparo um padrão de interferência (círculos concêntricos).
4. Ajuste cuidadosamente as posições dos espelhos e da(s) lente(s) de modo a obter a imagem de círculos concêntricos.

Biografia

A. A. Michelson foi o primeiro cientista americano a receber o Nobel de Física, em 1907, por suas contribuições no estudo da luz. O experimento de Michelson-Morley demonstrou a inexistência do ether, uma substância na qual as ondas eletromagnéticas deveriam se propagar.

5. Gire o micrométrico até obter uma imagem em que o círculo central seja escuro. Anote a posição inicial lida no micrômetro.
6. Para iniciar as medidas, gire o micrômetro para deslocar o espelho móvel. Ao mesmo tempo, conte o número n de vezes em que o centro muda para claro e volta para escuro. Conte pelo menos $n=50$. Se o ponto central do círculo deslocar-se é necessário reajustá-lo.
7. Após a contagem, anote a posição final do espelho móvel e calcule o deslocamento.
8. Repita os procedimentos dos itens 6,7 com outros valores de n (por exemplo $n=55$ e $n=60$).

5.3.3 Análise dos dados

1. Indique em um esquema do arranjo experimental os caminhos percorridos pelos raios luminosos.
2. Use os dados obtidos para determinar o comprimento de onda da luz do laser. Lembre-se que um valor lido no micrômetro deverá ser dividido por 10.
3. Calcule o desvio padrão do valor médio.
4. Compare o valor do desvio padrão da medida com a precisão do equipamento.

5.4 Conclusão

A análise dos dados é um pouco extensa, por isso, procure não perder o foco na compreensão dos fenômenos físicos aqui estudados. O Interferômetro de Michelson está no seu dia a dia e você não sabe. Todos leitores de cds e dvds são baseados do princípios de interferência da luz. Procure se questionar como um cd ou dvd é gravado. Qual a relação do comprimento de onda com a capacidade de armazenamento de informação? E a polarização? Onde ela aparece como aplicação tecnológica? Um lugar legal para procurar na internet é a wikipédia. <http://pt.wikipedia.org/>



RESUMO

Nesta última aula pudemos verificar experimentalmente o caráter ondulatório da luz através de dois fenômenos, a polarização e a interferência.

Uma onda eletromagnética está polarizada quando o seu vetor campo elétrico está contido em um único plano, chamado plano de polarização. Através de polarizador, que absorvem a luz na direção perpendicular a este plano, polarizamos a luz e vimos que a intensidade é governada pela lei de Mallus. Foi testada também a polarização por reflexão que polariza parcialmente o feixe. A polarização total por reflexão só é conseguida quando o feixe incidente atinge a interface no ângulo de Brewster.

A interferência da luz foi verificada no Interferômetro de Michelson. Neste experimento através da interferência dos feixes de laser, foi possível determinar o comprimento de onda do laser.



ATIVIDADES

Deixamos como atividade a seguinte tarefa:

ATIV. 5.1. a) O que vem a ser onda plano-polarizada, elíptica e circularmente polarizada.

b) Dois polarizadores têm suas direções de polarização paralelas. De que ângulo se deve girar um deles tal que a intensidade se reduza à metade?

ATIV. 5.2. Procure diversas aplicações tecnológicas que utilizam o Interferômetro de Michelson.



LEITURA COMPLEMENTAR

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A.; SEARS, Francis W.; ZEMANSKY, Mark W. Física. 10^a São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2005. v.2 e v.3

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de física. 7^a Rio de Janeiro: LTC, 2006. v.2 e v.4

TIPLER, Paul A. Física para cientistas e engenheiro. 3^a Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos, 1995. v.2, v.3 e v.4

ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J. Física: um curso universitário. 2^a rev. São Paulo: Edgard Blücher, 2005. v.1 e v.2