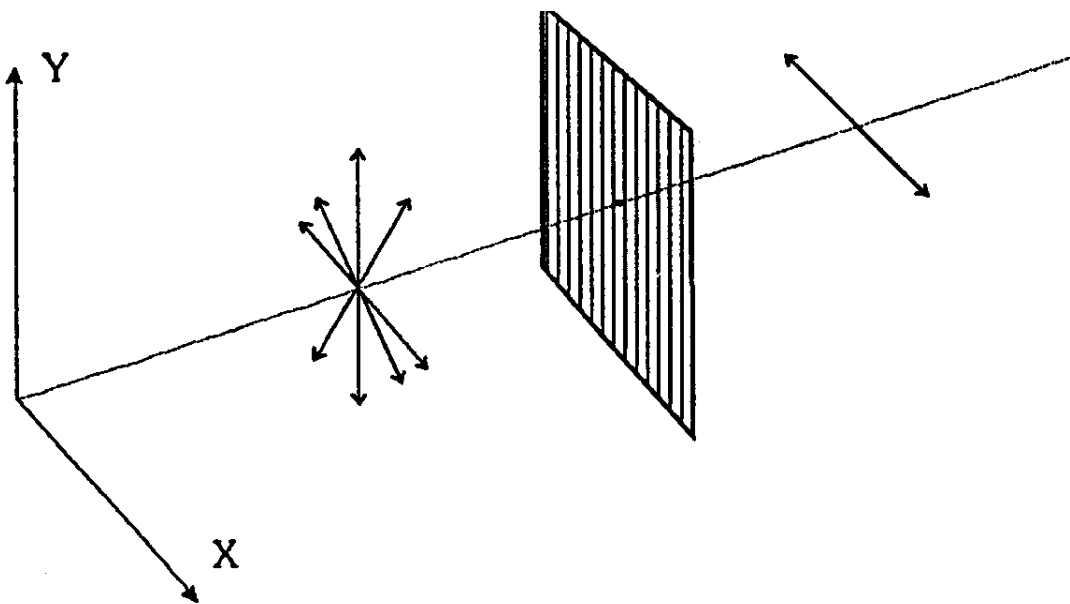


Polarização

Nesta atividade de laboratório você irá estudar a polarização da luz. Por ser uma onda eletromagnética transversal, a luz pode apresentar o efeito de polarização. Polarizar a luz significa selecionar uma direção para a vibração do seu campo elétrico \mathbf{E} . Quando as vibrações de \mathbf{E} numa onda luminosa são paralelas entre si, formando um plano com a direção de propagação desta onda, tem-se luz plano-polarizada. Há muitas formas de se obter luz plano-polarizada, aqui abordaremos a polarização por absorção, por espalhamento, por reflexão e por dupla refração. Este conteúdo você encontrará no cap. 48 do livro Física 4^a edição de Halliday e Resnick.

POLARIZAÇÃO POR ABSORÇÃO

Considere uma rede de fios condutores como mostra a figura abaixo. Sobre esta rede incide luz não polarizada.



Decompomos o \mathbf{E} da luz incidente nas direções X e Y, obtendo as componentes E_X e E_Y . E_Y forçará os elétrons "livres" do fio a se moverem ao longo da direção Y. Em função deste movimento, os elétrons "livres" acabam por colidir com os átomos e, desta forma, transferindo a sua energia aos fios na forma de calor. Portanto, a energia na direção Y da onda incidente é absorvida pelos fios condutores. Por outro lado, os elétrons "livres" dos fios não podem se mover na direção X devido ao diminuto diâmetro dos fios e, portanto, o E_X não é afetado ao propagar-se através da rede. Assim, a rede transmite uma onda plano-polarizada na direção X.

Esta idéia é implementada na prática nas lâminas "polaróides". Estas são produzidas com polímeros que são macromoléculas orgânicas muito compridas. Quando estes polímeros são esquentados e depois, simultaneamente, resfriados e tensionados, as macromoléculas acabam

por se alinhar na direção da tensão. Depois, por um processo químico, são "presos" na estrutura dos polímeros átomos eletronegativos (como o iodo). Os elétrons de condução destes átomos podem se mover pela macromolécula como se ela fosse um fio condutor. Assim, o conjunto se assemelha a uma rede de fios condutores paralelos.

Observe a luz de uma lâmpada através de um polarizador. *Girando o polaróide, muda a intensidade da luz transmitida?* Observe agora a lâmpada através de dois polaróides com as suas faces paralelas. O primeiro (mais próximo da lâmpada) é chamado de polarizador e o outro, de analisador. *Girando um em relação ao outro, muda a intensidade da luz transmitida? Por quê?* Com os dois polaróides cruzados (isto é, intensidade transmitida mínima), introduza um terceiro polaróide entre os dois e gire-o. *Explique o que ocorre.*

POLARIZAÇÃO POR ESPALHAMENTO

A polarização da luz pode ser alterada ao atravessar um meio material. Para este fim, é necessário estudar a interação da luz (uma onda eletromagnética) com a matéria. Um modelo simplificado para a estrutura atômica consiste em considerar os elétrons (-) presos ao núcleo atômico (+) por molas (como mostra a figura ao lado). Para um elétron mais fortemente (fracamente) ligado, neste modelo se considera um k da mola maior (menor). Este modelo, do ponto de vista da Física Quântica (como você verá mais adiante) é inadequado, mas para explicar a polarização da luz ele é muito útil. Deve-se, então, estudar a interação do campo elétrico oscilante da luz ($E = E_0 \cos wt$) com as cargas elétricas atômicas. Para as frequências da luz visível ($\sim 10^{14}$ Hz), a inércia dos núcleos atômicos é muito grande para acompanhar as rápidas variações do E da luz; mas os elétrons, com massa muito menor, podem acompanhar a vibração do campo. Como a energia fornecida pelo E da luz aos elétrons normalmente não é suficiente para arrancá-los dos átomos, os elétrons, forçados por E , acabam vibrando em torno do núcleo com a mesma frequência de E , podendo ser considerados como dipolos elétricos oscilantes. Estes reirradiam a energia eletromagnética segundo o padrão de radiação de um dipolo elétrico oscilante, representado na figura encartada ao lado. Nesta figura, de a) até d), procura-se evidenciar graficamente como se origina este padrão. Observe como mudam as linhas de força do campo E à medida que as cargas "+" e "-" do dipolo alternam a posição.

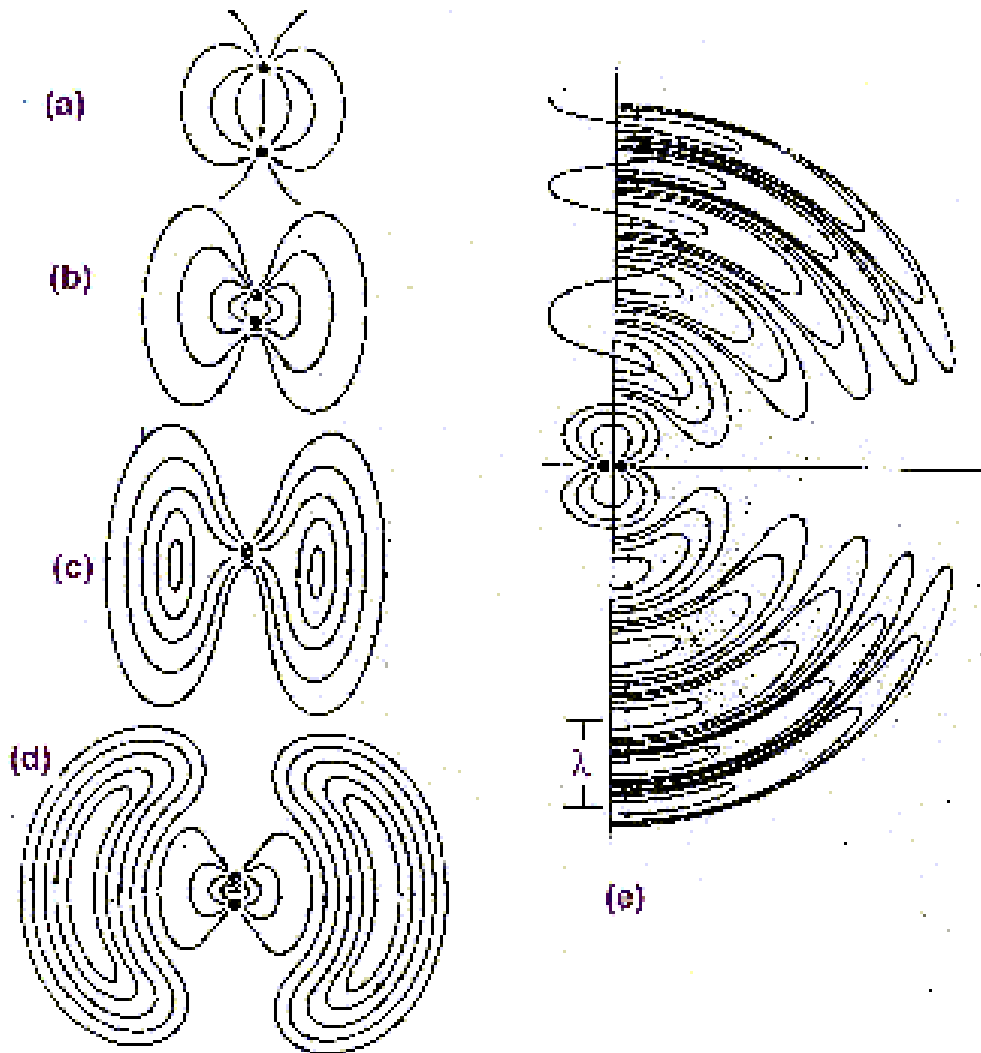
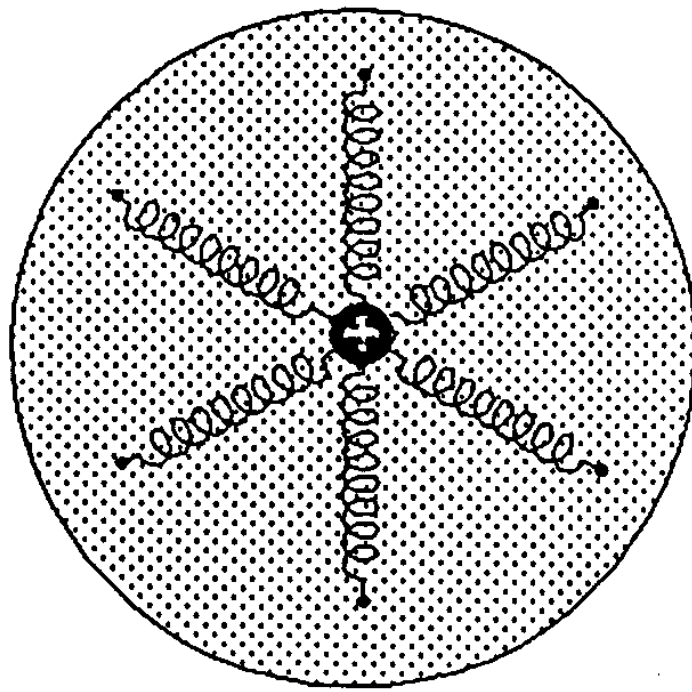
Longe do dipolo as linhas de força criam uma estrutura de "lobo" que propagam-se para fora à medida que o dipolo oscila [(e) na figura]. A linha mais forte nesta figura representa a variação do E irradiado pelo dipolo na direção considerada. A frequência do campo irradiado é a mesma do campo incidente que força o dipolo a oscilar. Note que a intensidade do E irradiado é máxima sobre o plano que corta o dipolo ao meio e a intensidade do E irradiado é nula na direção do eixo do dipolo. Esta assimetria no padrão de radiação do dipolo oscilante é muito importante para a polarização.

Deve-se lembrar que o elétron (que tem massa m_e), devido ao k da mola, tem uma frequência natural de oscilação $w_0 = \{k/m_e\}^{0.5}$. Dependendo da frequência angular da luz w incidente sobre o átomo, temos que considerar dois casos: $w = w_0$ (ressonância) e $w \neq w_0$. Na ressonância, num meio denso, as condições são propícias para a absorção da energia da luz pelo átomo, pois a amplitude da oscilação do elétron é máxima nesta situação. Isto favorece

a colisão deste elétron com os átomos vizinhos (o meio é denso) e desta forma a energia da luz incidente é absorvida, sendo transformada em calor (oriundo das colisões) no material. Para $\omega \neq \omega_0$, esta chance de colisão diminui pois agora os elétrons vibram em relação ao núcleo com uma amplitude menor. Assim, estes elétrons podem ser considerados como dipolos elétricos oscilantes, re-emitindo a energia da luz incidente na forma de uma onda ($E = E_0 \cos \omega t$) conforme o padrão de radiação de um dipolo elétrico oscilante [figura (e)].

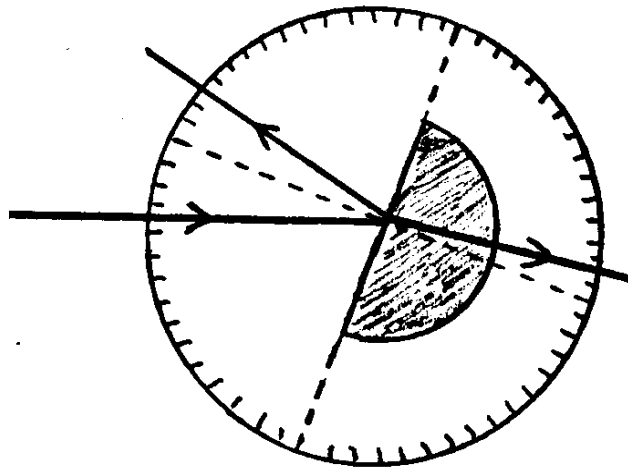
Vamos considerar um balão de vidro cheio de água. Sobre ele faz-se incidir luz. Você observará o feixe luminoso atravessando o balão. Isto é possível porque a luz do feixe incidente foi espalhada até o seu olho. O espalhamento consiste na retirada de energia de uma onda incidente e a posterior reemissão de uma fração desta energia. Com luz não polarizada incidindo sobre o balão com água, observe com um polaróide a luz espalhada em várias direções. Em cada direção escolhida gire o polaróide e observe o grau de polarização da luz espalhada. *Em que direção (plano) ocorre a polarização total (ou quase total) da luz espalhada?* Polarize agora o feixe incidente e observe a luz espalhada na direção antes determinada. Gire o plano de polarização da luz incidente até observar a máxima intensidade da luz espalhada. *Verifique o estado de polarização da luz espalhada.*

Considerando o balão de vidro com água como sendo um dipolo elétrico e sabendo a figura do padrão de radiação de um dipolo oscilante, interprete seus ressaltados em termos deste modelo. Finalmente, determine a direção característica de seus polaróides (isto é, a direção na qual eles transmitem luz plano-polarizada).



POLARIZAÇÃO POR REFLEXÃO

Observe, girando um polaróide diante do olho, a luz refletida, em diferentes direções, pela superfície da mesa, do vidro, etc. Faça o mesmo olhando a reflexão de um objeto metálico como a torneira da sala. *O que você nota?*



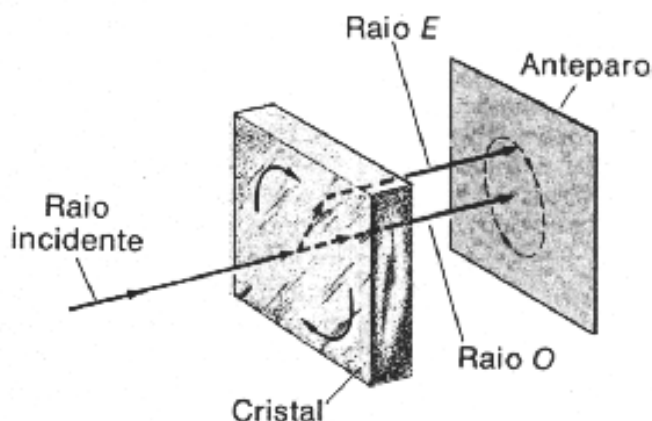
Faça incidir um feixe luminoso bem rente ao centro de um disco graduado. Prenda neste disco um cilindro de plexiglass de seção reta semicircular, com a luz incidindo sobre a face reta, como mostra a figura ao lado. Assim você pode medir os ângulos de incidência, reflexão e refração. Conhecendo a direção de polarização do polaróide (obtida na polarização por espalhamento), incida luz plano-polarizada sobre o disco de } duas formas: (a) com as vibrações de \mathbf{E} paralelas à interface ar-plexiglass e (b) com \mathbf{E} vibrando no plano formado pelo feixe incidente e a normal desta interface (é o chamado plano de incidência).

Observe o que ocorre, nas duas situações, quando se varia o ângulo de incidência. Como você pode interpretar estes resultados em termos do modelo do dipolo oscilante?

Lembre-se que o \mathbf{E} dentro do plexiglass fará os elétrons dos átomos a oscilarem como se fossem dipolos elétricos. A direção do "vai-e-vem" dos elétrons é determinado pelo \mathbf{E} dentro do plexiglass, que é ortogonal à direção de propagação da luz dentro do plexiglass - direção esta que, em relação à luz incidente, é determinada pela lei da refração. Levando em consideração o padrão de radiação de um dipolo elétrico oscilante, certifique-se que as oscilações dos elétrons do plexiglass provocadas pelo \mathbf{E} paralelo à interface ar-plexiglass sempre irradiarão na direção do feixe refletido, qualquer que seja esta direção. Porém, o mesmo já não acontece para as oscilações provocadas pelo \mathbf{E} contido no plano de incidência. Veja o que acontece quando no plexiglass a direção do \mathbf{E} contido no plano de incidência coincide com o feixe refletido. *Neste caso, há irradiação na direção do feixe refletido? Nesta situação, há alguma relação que se possa estabelecer entre os ângulos de incidência, reflexão e refração?*

POLARIZAÇÃO POR DUPLA REFRAÇÃO

Antes, no estudo da polarização por espalhamento, considerou-se um "átomo" representativo de um meio isotrópico, eis que todas as molas tinham o mesmo k . Agora vamos considerar uma situação em que se tenha molas com k diferentes, como ilustra a figura ao lado. No plano XZ as molas tem uma constante k' maior que k na direção Y. Este arranjo de molas diferentes resulta numa anisotropia ótica que explica a origem da dupla refração ou birrefringência. Se considerarmos luz incidindo sobre um material formado por átomos deste tipo, onde os elétrons estão presos por molas com k diferentes, eles absorverão e reemitirão a luz incidente de forma diferenciada espacialmente. Isto implicará que a propagação da luz neste meio também será diferenciada, resultando duas velocidades extremas de propagação da luz dentro do meio material. Lembrando que a razão entre as velocidades da luz no vácuo e no meio material dá o índice de refração deste meio, temos que 2 velocidades extremas determinam 2 índices de refração extremos, ou seja: dupla refração (birrefringência). A anisotropia espacial resultante das diferenças no "empacotamento" dos elétrons nos átomos do material birrefringente é caracterizada por uma direção chamada de eixo ótico.



Quando a luz incide normalmente sobre um material birrefringente como a calcita, observam-se 2 feixes emergentes: um é chamado de raio ordinário O (porque obedece a lei da refração) e o outro é chamado de raio extraordinário E (porque não obedece a lei da refração. *Por quê?*) Quando se gira o cristal de calcita, o raio E acompanha esta rotação. De uma maneira geral, para incidência da luz com qualquer ângulo sobre o material birrefringente, sempre se observam dois raios emergentes paralelos. O raio O sempre tem a mesma velocidade, mas a velocidade do raio E varia, dependendo da orientação da luz incidente relativa ao eixo ótico, de um valor mínimo a um máximo. Na calcita, o raio E desloca-se mais rápido que o raio O. A velocidade do raio E é máxima quando a sua direção é perpendicular ao eixo ótico. Na calcita, para o raio O corresponde um $n_O = 1.66$ enquanto que, para o raio E, n_E varia desde 1,66, sobre o eixo ótico, até 1.49, perpendicularmente a ele.

Observando a imagem transmitida através de um cristal de calcita, verifique que os raios O e E são polarizados em planos perpendiculares entre si. Isto acontece porque, devido à anisotropia espacial das ligações dos elétrons aos núcleos nos átomos do meio birrefringente, os raios O e E são "gerados" por vibrações eletrônicas diferenciadas e ortogonais entre si. Com uma lâmpada iluminando polarizadores cruzados, coloque entre eles um material birrefringente (por exemplo: lâminas de celofane ou mica) e observe a imagem transmitida pelo conjunto.