

Ondas Eletromagnéticas.

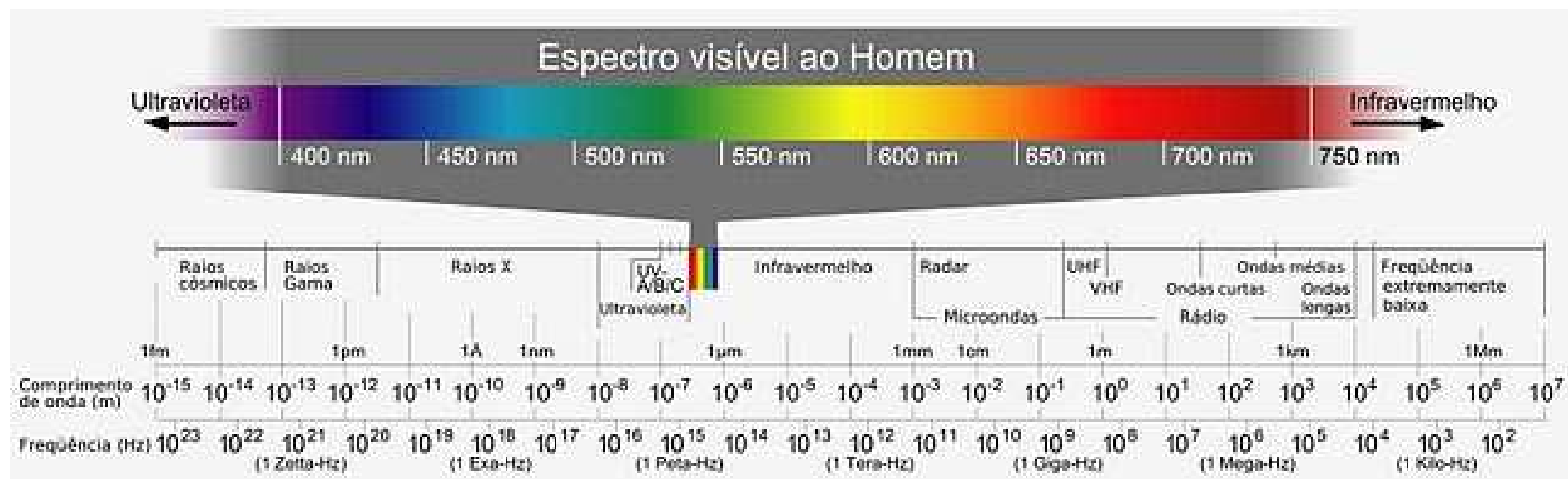
Cap. 33

33.1 Introdução

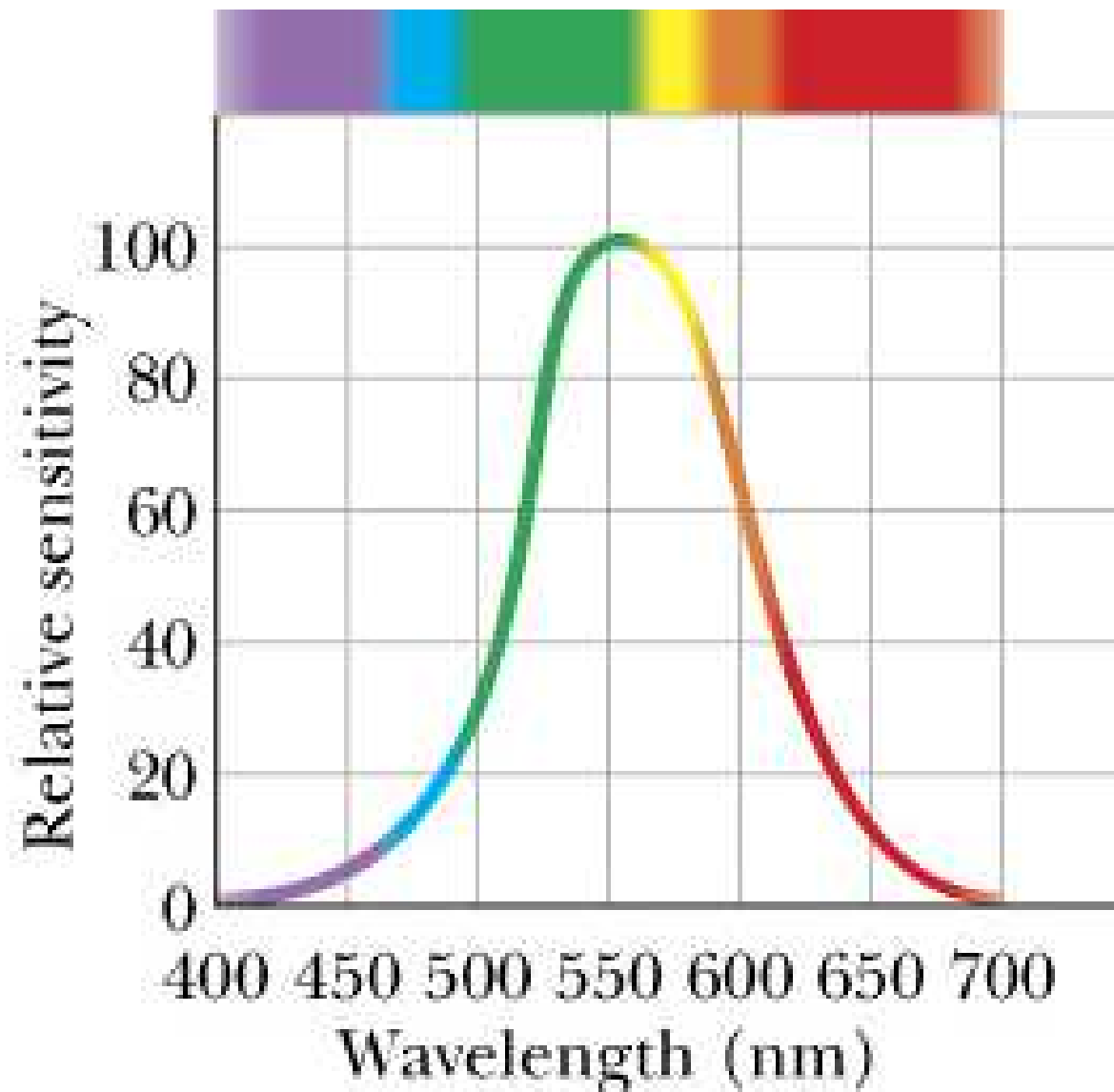
As ondas eletromagnéticas estão presentes no nosso dia a dia. Por meio destas ondas, informações do mundo são recebidas (tv, Internet, telefonia, rádio, etc). Tais ondas também estão presentes na luz, microondas e demais radiações eletromagnéticas.

33.2 O Arco-Íris de Maxwell.

James Clerk Maxwell mostrou que um raio luminoso é uma onda progressiva de campos elétricos e magnéticos e que a óptica, o estudo da luz visível, é um ramo do eletromagnetismo. Depois de Maxwell, Heinrich Hertz descobriu as ondas de rádio e verificou que se propagavam com a mesma velocidade da luz. Hoje conhecemos um largo *espectro* de ondas, o “arco-íris de Maxwell”.



A figura abaixo mostra a sensibilidade relativa do olho humano a ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos de onda (luz visível).



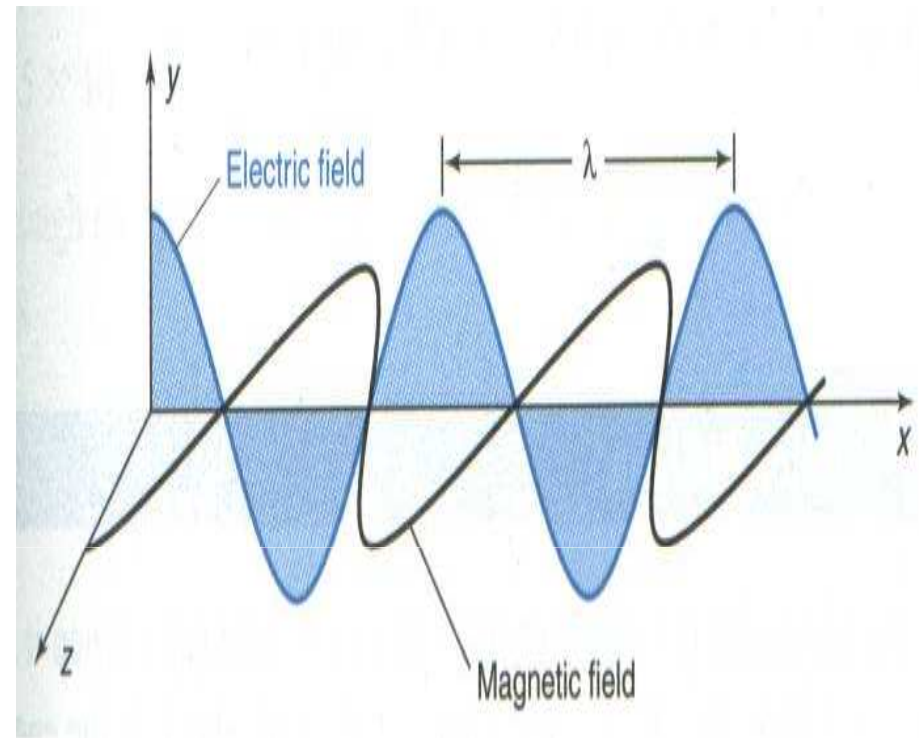
33.3 Descrição Qualitativa de uma Onda Eletromagnética.

Uma onda eletromagnética é formada pela interação de dois campos, um elétrico (E) e outro magnético (B), que são perpendiculares entre si.

O produto vetorial $\vec{E} \times \vec{B}$ aponta no sentido de propagação da onda e os campos variam senoidalmente, o que permite escrevê-los na forma:

$$E = E_m \sin(kx - \omega t) \quad \text{e}$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t)$$



Além da equação do capítulo 16, que mostra o cálculo da velocidade da luz,

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299.792.485 \text{ m/s}$$

ou seja, aproximadamente $3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Ela pode ser calculada também pelas razões:

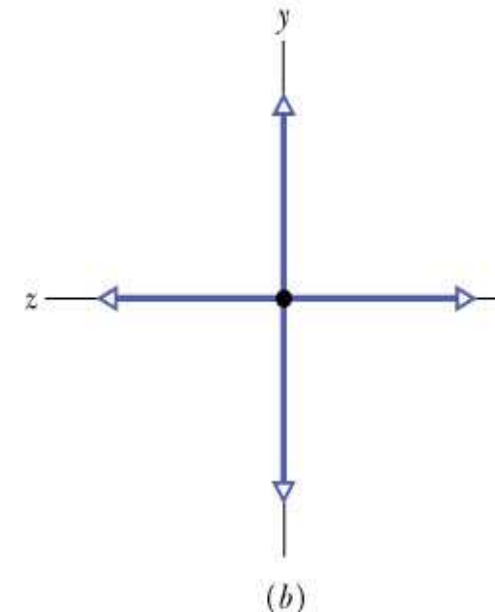
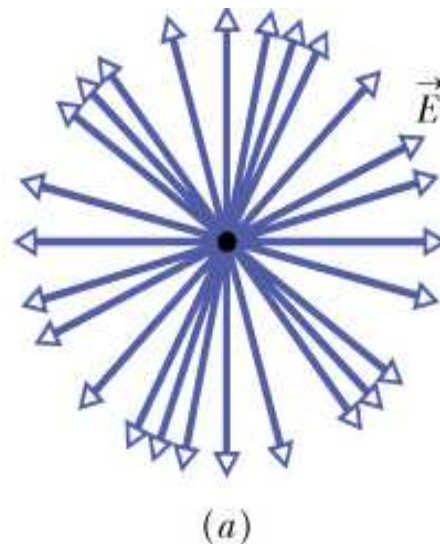
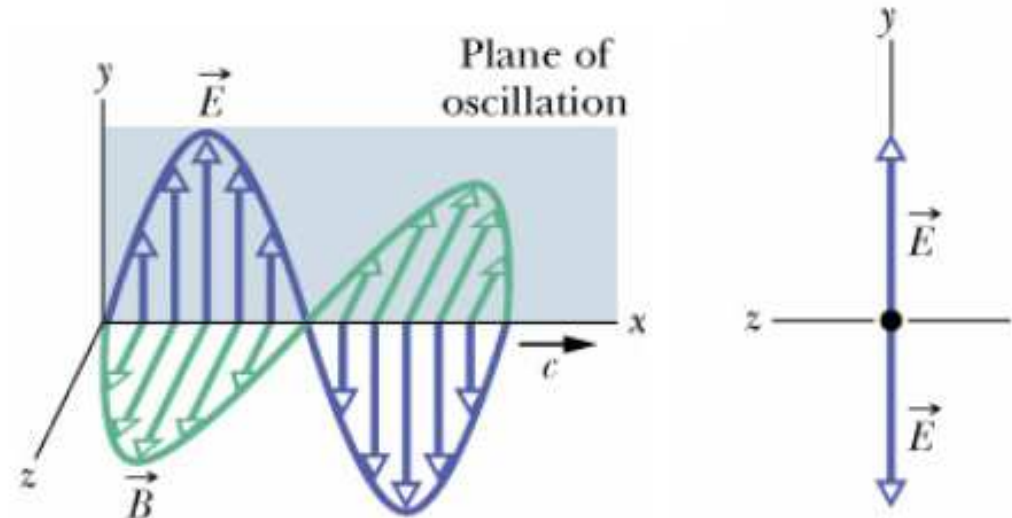
$$\frac{E}{B} = c$$

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

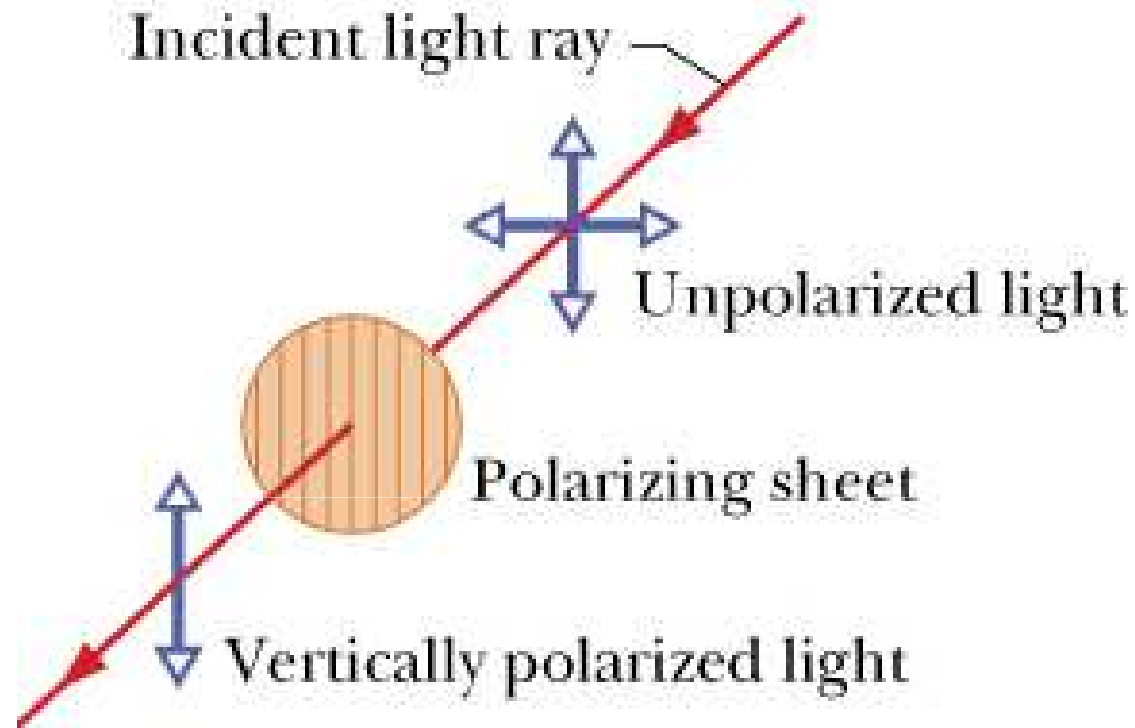
33.7 Polarização.

A figura ao lado mostra uma onda eletromagnética com campo elétrico oscilando paralelamente ao eixo vertical (y). O plano que contém o vetor E é chamado de plano de polarização da onda.

Uma luz não-polarizada, mostrada na figura abaixo é formada por ondas com o campo elétrico em diferentes direções (a), que pode também ser representada na forma da figura (b).



É possível transformar a luz não-polarizada em polarizada fazendo-a passar por um filtro polarizador, como mostra figura abaixo.



“As componentes do campo elétrico paralelas à direção de polarização são transmitidas por um filtro polarizador; as componentes perpendiculares são absorvidas.”

Intensidade da Luz Polarizada Transmitida.

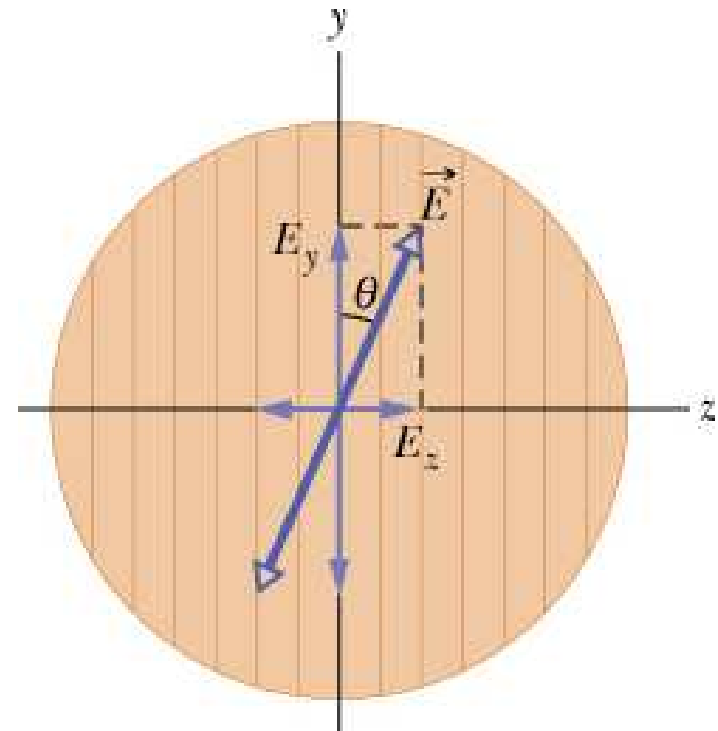
Considerando uma **luz não-polarizada** cujas oscilações de podem ser separadas em componentes y e z. Quando as componentes z são absorvidas, metade da intensidade I_0 da onda original é perdida. A intensidade I da luz que emerge do filtro é, portanto:

$$I = \frac{1}{2} I_0$$

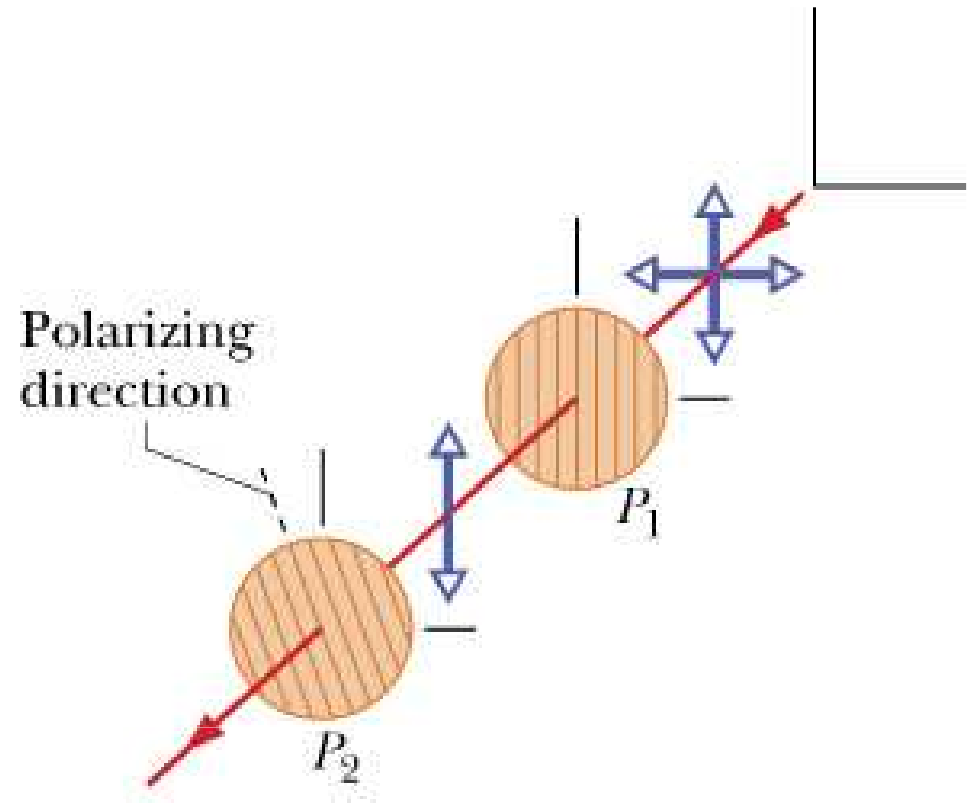
Esta é a chamada *regra da metade*, válida somente se a luz que incide no filtro polarizador for não-polarizada.

Se a luz que incide no polarizador **já é polarizada**, como no caso da figura ao lado, o campo pode ser separado em duas componentes, em relação a direção de polarização do filtro. No caso da figura, **E_y (transmitida) e E_z (absorvida)**. A componente paralela transmitida pode ser calculada por:

$$E_y = E \cos \theta$$



No caso que estamos analisando, a intensidade I da onda emergente é proporcional E_y^2 e a intensidade I_0 da onda original é proporcional a E^2 , assim

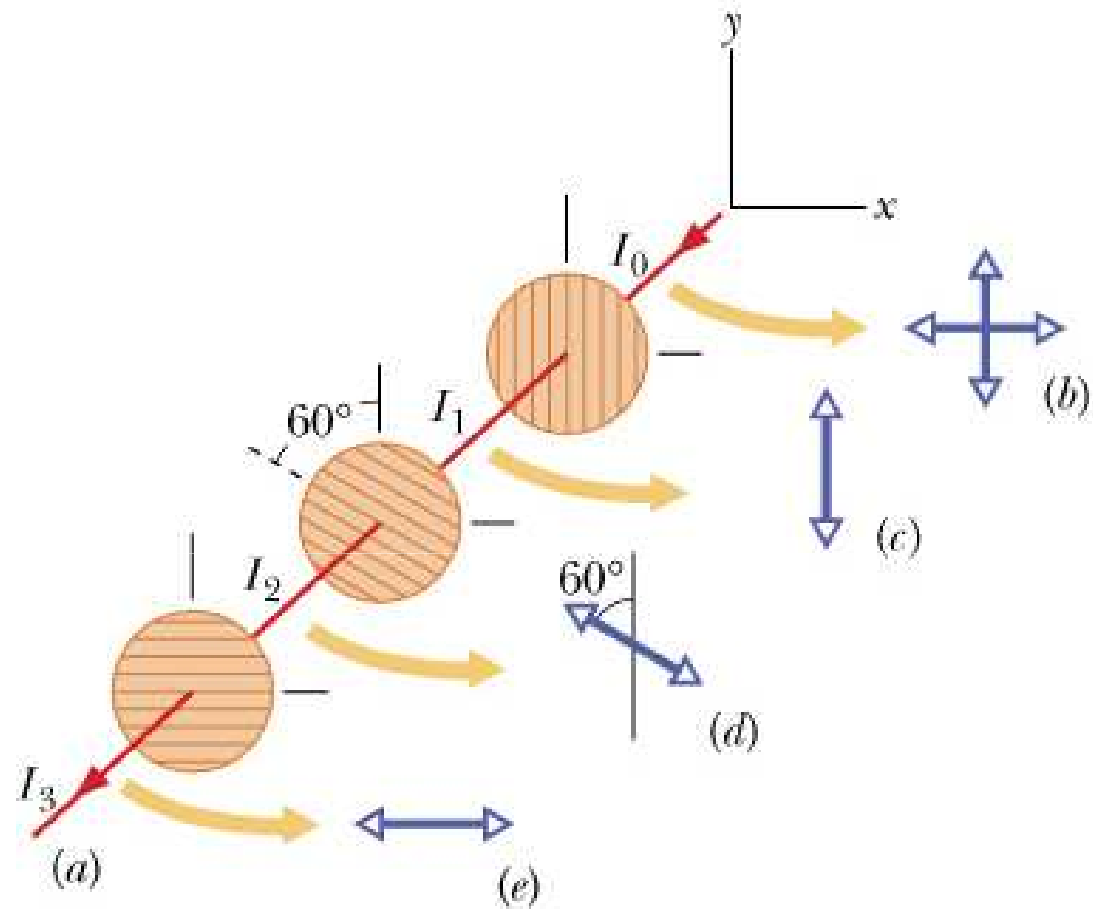


$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Válida se a luz que incide no polarizador já for polarizada.

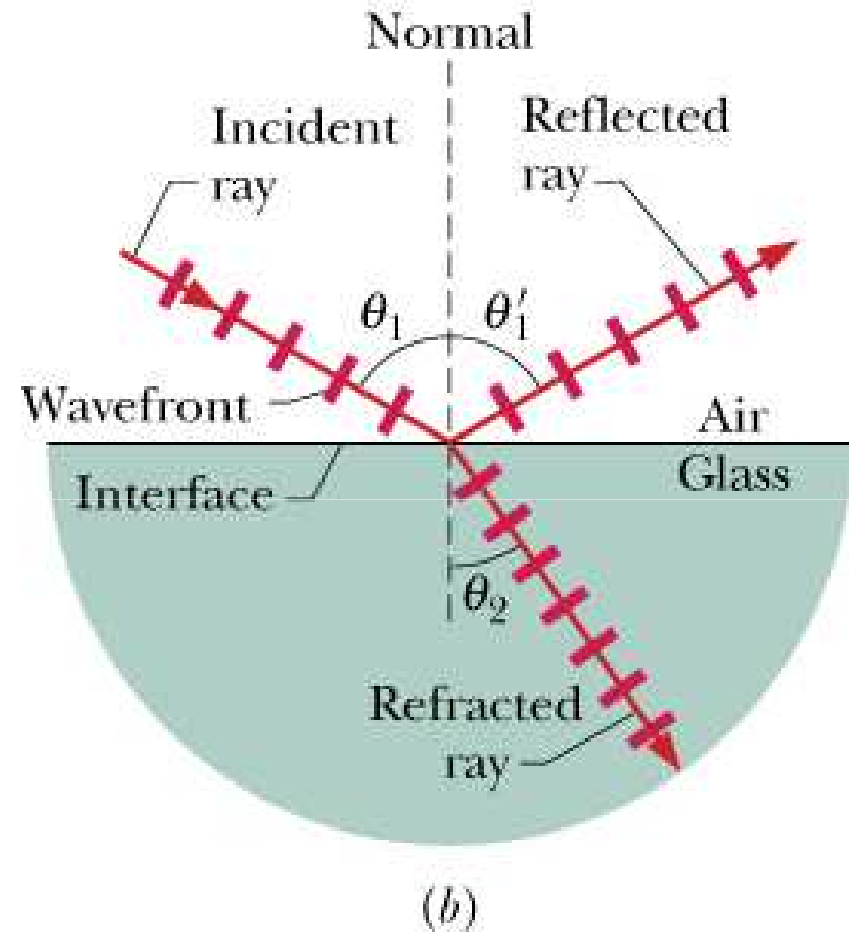
Exercício 1:

A figura ao lado, desenhada em perspectiva, mostra um conjunto de três filtros polarizadores sobre o qual incide um feixe de luz inicialmente não-polarizada. A direção de polarização do primeiro filtro é paralela ao eixo y , a do segundo faz um ângulo de 60° com a primeira no sentido anti-horário e a do terceiro é paralela ao eixo x . Que fração da intensidade inicial I_0 da luz sai do conjunto e em que direção esta luz está polarizada?



33.8 Reflexão e Refração

Embora as ondas luminosas se espalhem ao se afastarem da fonte, a hipótese de que a luz se propague em linha reta, constitui uma boa aproximação. O estudo das propriedades das ondas luminosas usando esta aproximação é chamado de óptica geométrica. Quando um raio luminoso passa de um meio para o outro, parte dele é refletido e parte é transmitido (refratado) no outro meio. Na figura, θ_1 , θ'_1 e θ_2 são os ângulos de *incidência*, *reflexão* e *refração* respectivamente.



animação

Resultados experimentais mostram que a reflexão e refração obedecem as seguintes leis:

Lei da Reflexão: O raio refletido está no plano de incidência e tem um ângulo de reflexão igual ao ângulo de incidência.

$$\theta_1' = \theta_1$$

Lei da Refração: O raio refratado está no plano de incidência e tem um ângulo de refração que está relacionado ao ângulo através da equação:

$$n_2 \operatorname{sen} \theta_2 = n_1 \operatorname{sen} \theta_1$$

Lei de Snell - Descartes

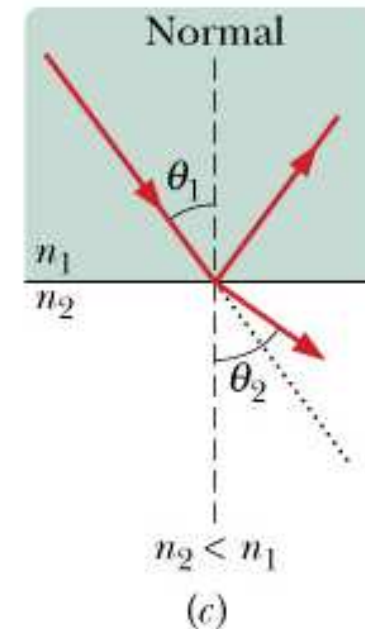
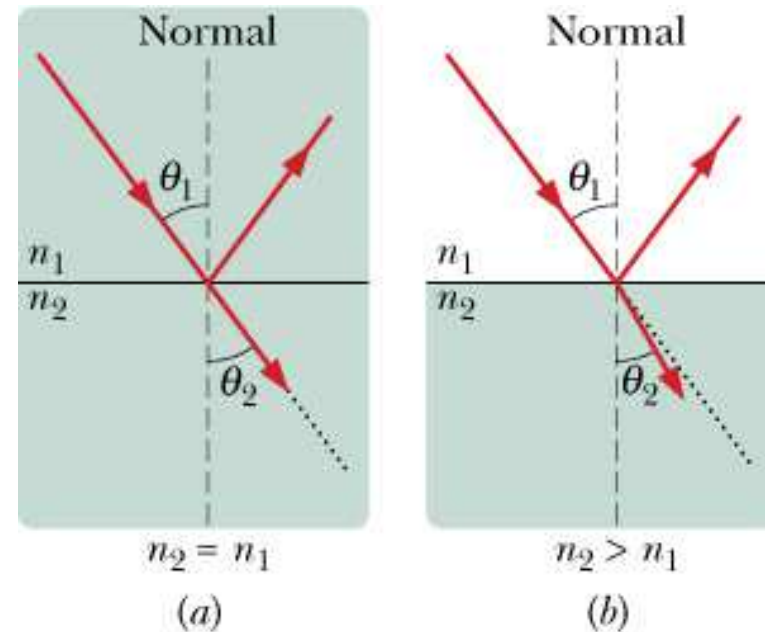
Onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios 1 e 2.

$$n = \frac{c}{v} \rightarrow n \geq 1$$

Se $n_2 = n_1$ e $\theta_1 = \theta_2$. Neste caso, a refração não desvia o raio luminoso que continua a sua *trajetória retilínea* (a).

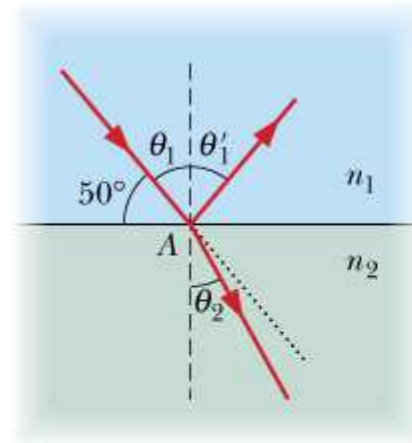
Se $n_2 > n_1$ e $\theta_1 > \theta_2$. Neste caso, a refração faz o raio luminoso se aproximar da normal (b).

Se $n_2 < n_1$ e $\theta_1 < \theta_2$. Neste caso, a refração faz o raio luminoso se afastar da normal (c).

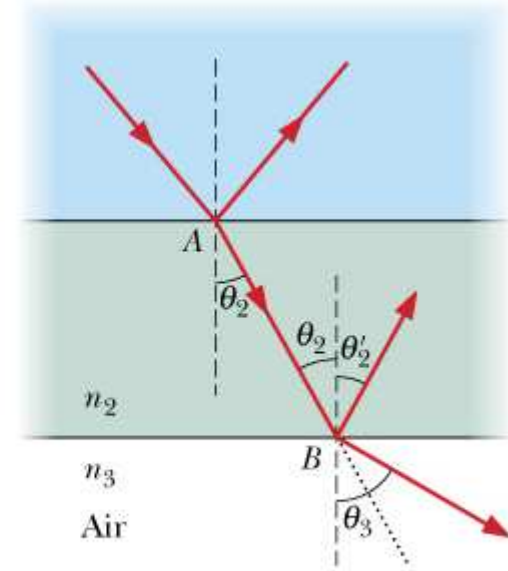


Exercício 2:

Na figura abaixo (a), um feixe de luz monocromática é refletido e refratado no ponto A da interface entre a substância 1, cujo índice de refração é $n_1=1,33$, e a substância 2, cujo índice de refração é $n_2=1,77$. O feixe incidente faz um ângulo de 50° com a interface. Qual é o ângulo de reflexão no ponto A? Qual é o ângulo de refração? A luz que penetrou na substância 2 no ponto A chega ao ponto B da interface entre a substância 2 e a substância 3, que é o ar, como mostra a figura (b). As duas interfaces são paralelas e no ponto B, parte da luz é refletida e parte é refratada. Qual é o ângulo de reflexão? Qual o ângulo de refração?



(a)

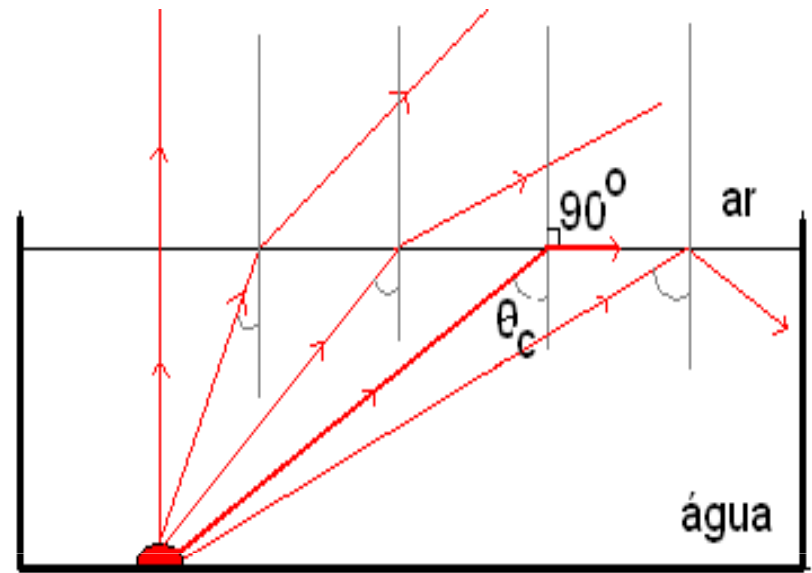


(b)

33.9 Reflexão Interna Total.

Na figura ao lado, raios luminosos são emitidos por uma fonte pontual no fundo de uma piscina. Na medida em que o ângulo de incidência aumenta, o raio se afasta da normal, até que saia rasante a superfície da água. Nesta situação, dizemos que o ângulo de incidência é o ângulo crítico, ou ângulo limite, na qual o ângulo refratado faz um ângulo de 90° com a normal. A partir do ângulo crítico não ocorre mais refração, apenas reflexão interna total.

Para determinarmos o valor de θ_c , usamos a lei de Snell:



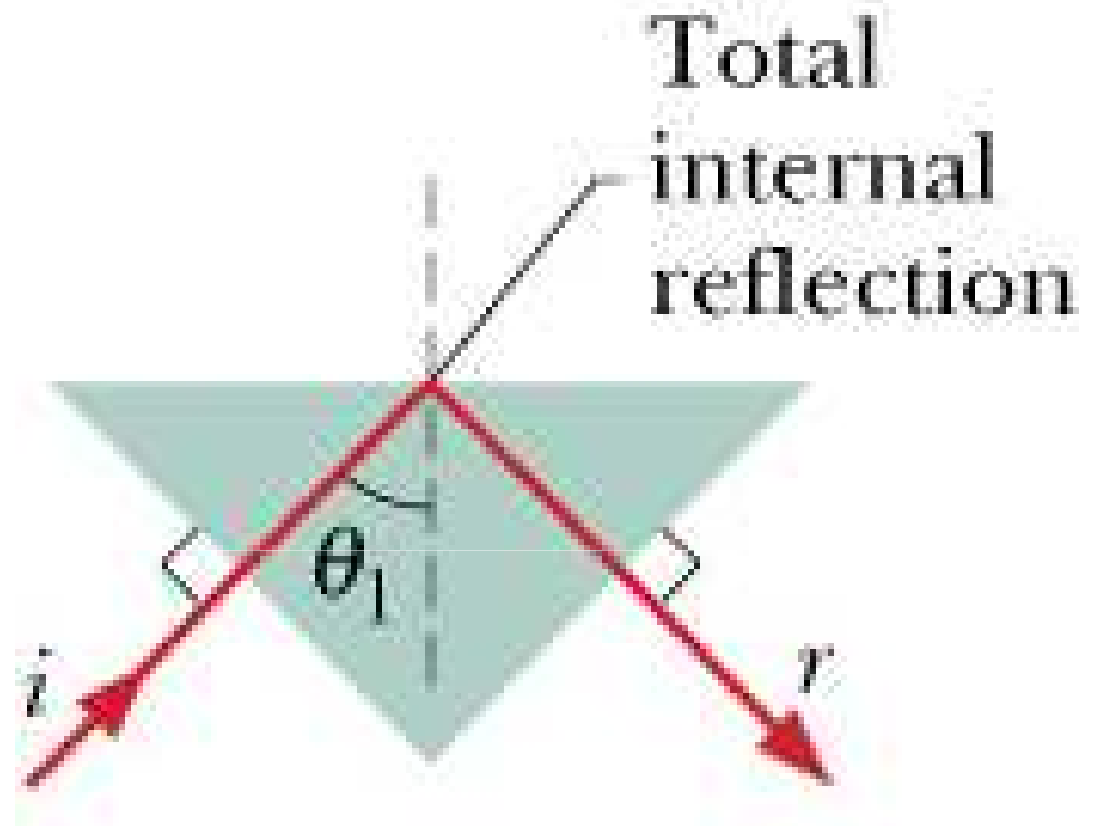
$$n_1 \sen \theta_c = n_2 \sen \theta_2 \rightarrow n_1 \sen \theta_c = n_2 \sen 90^\circ$$

$$\sen \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \theta_c = \sen^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração da água e do ar respectivamente.

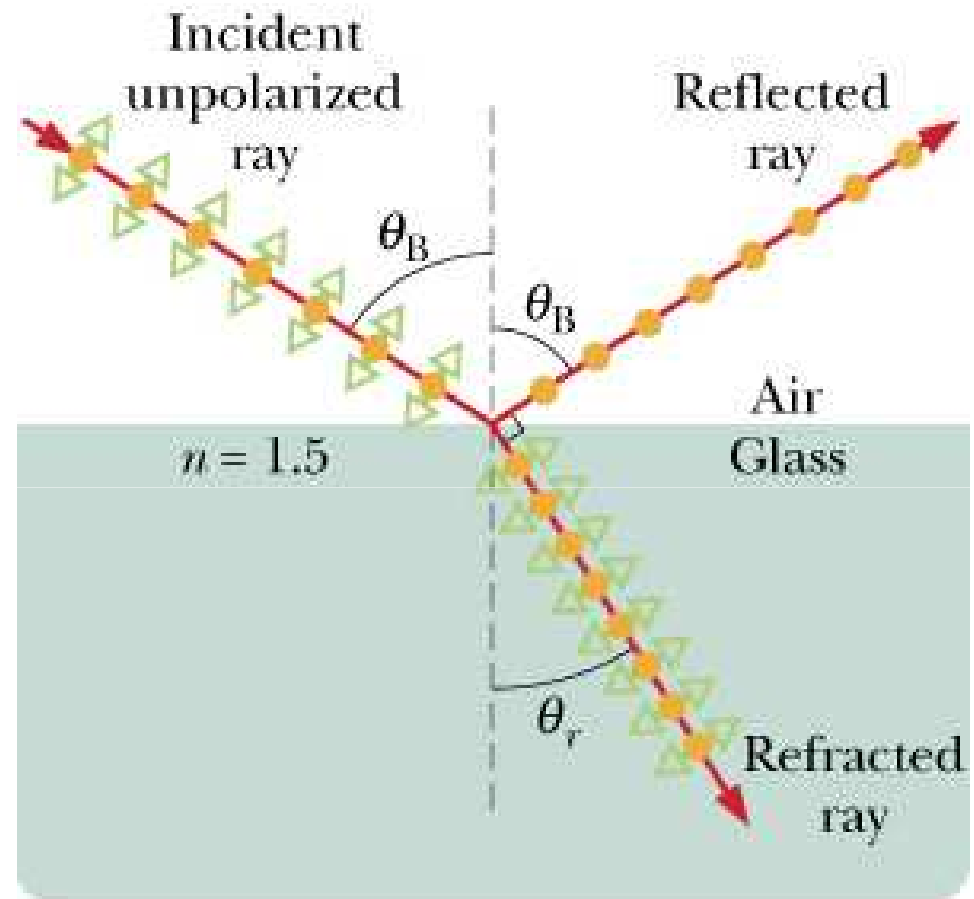
Exercício 3:

A figura mostra um prisma triangular de vidro imerso no ar. Um raio luminoso penetra no prisma perpendicularmente a uma das faces e é totalmente refletido na interface vidro-ar. Se $\theta_1 = 45^\circ$, o que se pode dizer a respeito do índice de refração n do vidro?



33.10 Polarização por Reflexão.

A figura ao lado mostra um raio de luz não-polarizada incidindo em uma superfície de vidro. Para um certo ângulo de incidência, conhecido como **ângulo de Brewster**(θ_B) a luz refletida possui apenas a componente perpendicular, ou seja, é totalmente polarizada. A luz refratada possui as duas componentes, paralela e perpendicular.



- Component perpendicular to page
- ↔ Component parallel to page

A Lei de Brewster – Observa-se experimentalmente que o ângulo de Brewster é aquele para o qual os raios refletido e refratado são perpendiculares. Na figura, teremos que:

$$\theta_B + \theta_r = 90^\circ$$

Usando a Lei de Snell para a figura acima, teremos:

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin \theta_r$$

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin (90^\circ - \theta_B) = n_2 \cos \theta_B$$

o que nos leva a:

$$\theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1} \rightarrow \text{Lei de Brewster}$$

Se os raios incidente e refletido se propagam no ar, podemos fazer $n_1=1$ e $n_2=n$, que simplifica a equação acima em:

$$\theta_B = \tan^{-1} n \rightarrow \text{Lei de Brewster}$$

Exercício 4:

Na figura, um raio luminoso que estava se propagando inicialmente no ar incide em um material 2 com um índice de refração $n_2=1,5$. Abaixo do material 2 está o material 3, com índice de refração n_3 . O raio incide na interface ar-material 2 com o ângulo de Brewster para esta interface e incide na interface material 2-material 3 com o ângulo de Brewster para esta interface. Qual é o valor de n_3 ?

