



Universidade Federal do ABC

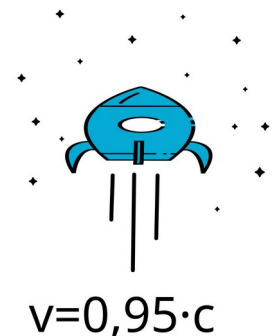
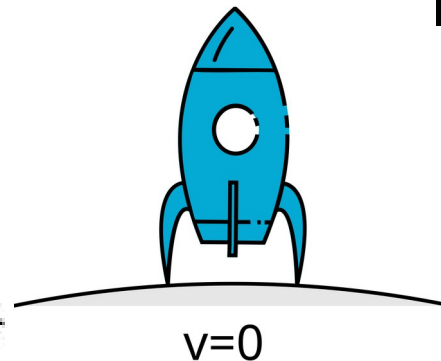
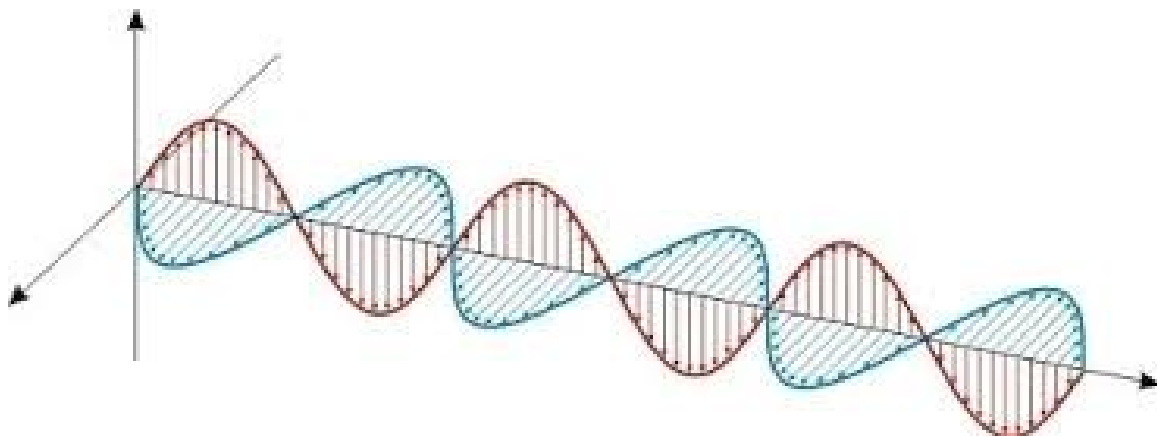
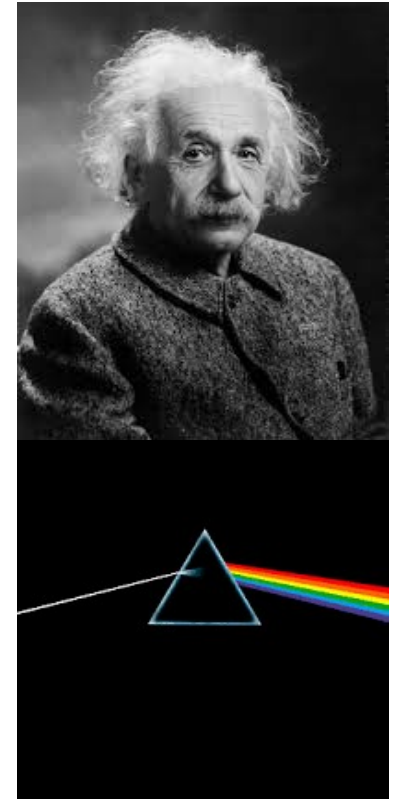
Ótica e Relatividade

10. Polarização da luz, Ótica Ondulatória: Interferência

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/OtRel.html>



Polarização da Luz

A **polarização** da **luz** descreve a **direção** na qual o **campo elétrico oscila**.

Nosso **olho não** detecta a **polarização** (Porém, certos animais, como abelhas e caranguejos-violinistas



conseguem detectar e usá-la pra orientação), mas ela é **importante** para **entender** certos **processos** na **física** e te, várias **aplicações** na **tecnologia**.

Polarização da Luz

Formalismo

Na aula passada, escrevemos os **campos elétrico e magnético** de uma **onda plana propagando-se** na **direção \mathbf{k}** cujo **campo elétrico oscila** na **direção $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \perp \mathbf{k}$** , situação chamada **polarização linear** na direção $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$, assim:

$$\mathbf{E} = E_{\max} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi) = E_{\max} \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \operatorname{Re}\{e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \varphi)}\},$$

$$\mathbf{B} = 1/c \cdot \hat{\mathbf{v}} \times \mathbf{E}$$

$$\text{vale } \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} \cdot \hat{\mathbf{v}} = 0$$

O **vetor unidade $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$** é chamado **versor de polarização**. Já que \mathbf{E} (ou $\hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$) deve estar no **plano $\perp \mathbf{k}$** , podemos usar uma "**base**" de **duas dimensões** para especificar o **campo elétrico** (e, em consequência, do **campo magnético**, que oscila na **mesmo plano**, mas $\perp \mathbf{E}$).

Polarização da Luz

Formalismo

Para facilitar nossa vida, escolhemos um sistema de coordenadas tal que \mathbf{k} é na direção z .

Aí, $\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}$ vira kz e uma possível base para descrever o campo elétrico (e o magnético) seria $\hat{\mathbf{x}}$ e $\hat{\mathbf{y}}$.

No caso de uma **polarização geral** podemos escrever:

$$E_x = a \cdot \text{Re}\{e^{i\varphi_x} \cdot e^{i(kz - \omega t)}\} = c \cdot B_y, \text{ e}$$

$$E_y = b \cdot \text{Re}\{e^{i\varphi_y} \cdot e^{i(kz - \omega t)}\} = -c \cdot B_x, \text{ onde}$$

$a, b \geq 0$ são as **amplitudes reais** das **componentes transversais**, e φ_x, φ_y , as respectivas constantes de **fase**.

Podemos escrever ainda $E_x = a \cdot \cos \Phi$, $E_y = b \cdot \cos (\Phi + \delta)$, onde $\Phi \equiv kz - \omega t$, $\delta \equiv \varphi_y - \varphi_x$.

Polarização da Luz

Formalismo

$$E_x = a \cdot \cos \Phi, E_y = b \cdot \cos (\Phi + \delta), \Phi \equiv kz - \omega t, \delta \equiv \varphi_y - \varphi_x$$

$$\Rightarrow \text{sen } \Phi = \pm \sqrt{1 - \cos^2 \Phi} = \pm \sqrt{1 - (E_x/a)^2},$$

$$E_y/b = \cos (\Phi + \delta) = \cos \Phi \cos \delta - \text{sen } \Phi \text{sen } \delta$$

$$\Rightarrow E_y/b - E_x/a \cdot \cos \delta = \pm \sqrt{1 - (E_x/a)^2} \cdot \text{sen } \delta \quad | \cdot^2$$

$$(E_y/b)^2 - 2E_x/a \cdot E_y/b \cdot \cos \delta + (E_x/a)^2 \cdot \cos^2 \delta$$

$$= [1 - (E_x/a)^2] \cdot \text{sen}^2 \delta$$

$$\Rightarrow (E_y/b)^2 - 2E_x/a \cdot E_y/b \cdot \cos \delta + (E_x/a)^2 \cdot (\cos^2 \delta + \text{sen}^2 \delta)$$

$$= \text{sen}^2 \delta$$

$$\Rightarrow (E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \text{sen}^2 \delta,$$

o que é da forma $A \cdot E_x^2 + B \cdot E_x E_y + C \cdot E_y^2 = D$,

que descreve uma **elipse** no **plano E_x - E_y** centrado em

$$(E_x, E_y) = (0, 0).$$

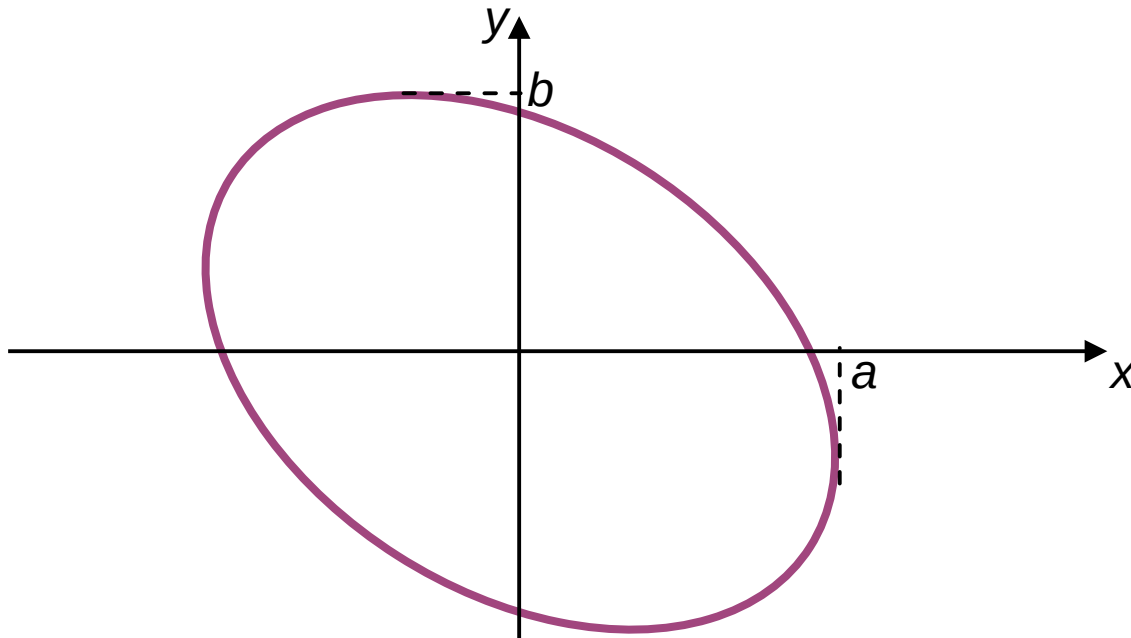
Polarização da Luz

Formalismo

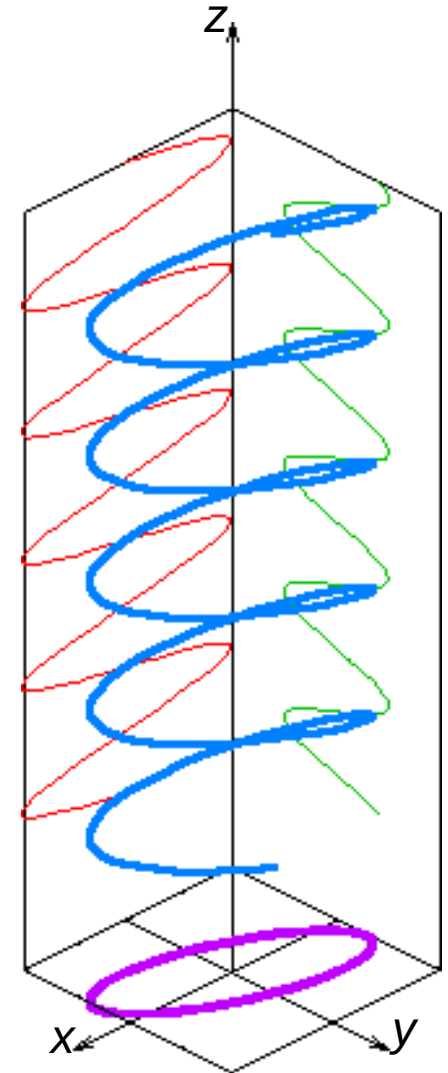
$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \text{sen}^2 \delta$$

O que significa isto?

A **ponta** do **vetor E** descreve uma **elipse**



=> **Polarização elíptica**

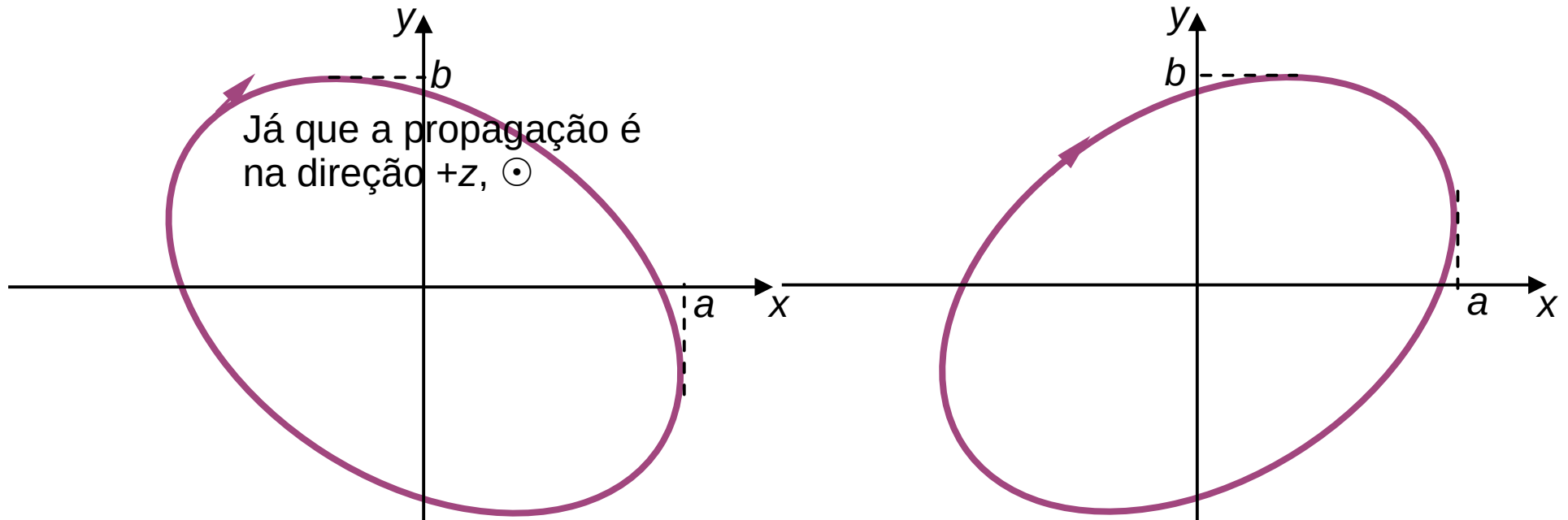


Polarização da Luz

Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \sin^2 \delta$$

$$0 < \delta < \pi \text{ (ou esta faixa } \pm \text{ um múltiplo de } 2\pi)$$



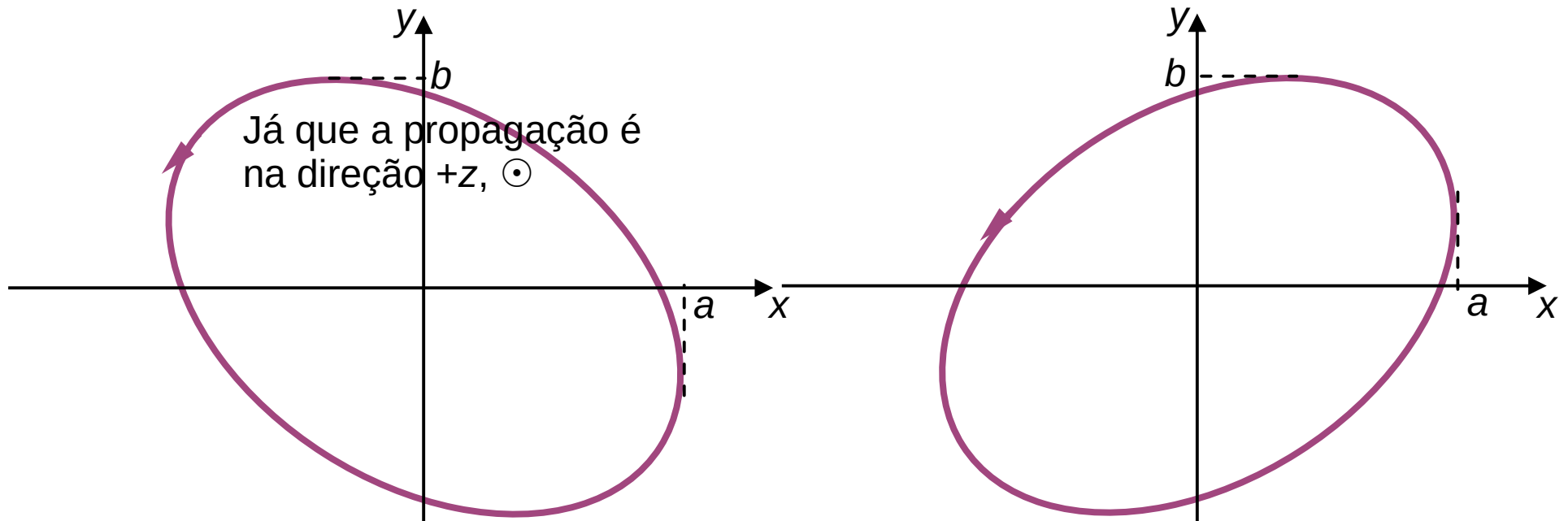
=> Polarização elíptica (anti-horário ou a direita)

Polarização da Luz

Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \sin^2 \delta$$

$$\pi < \delta < 2\pi \text{ (ou esta faixa } \pm \text{ um múltiplo de } 2\pi)$$



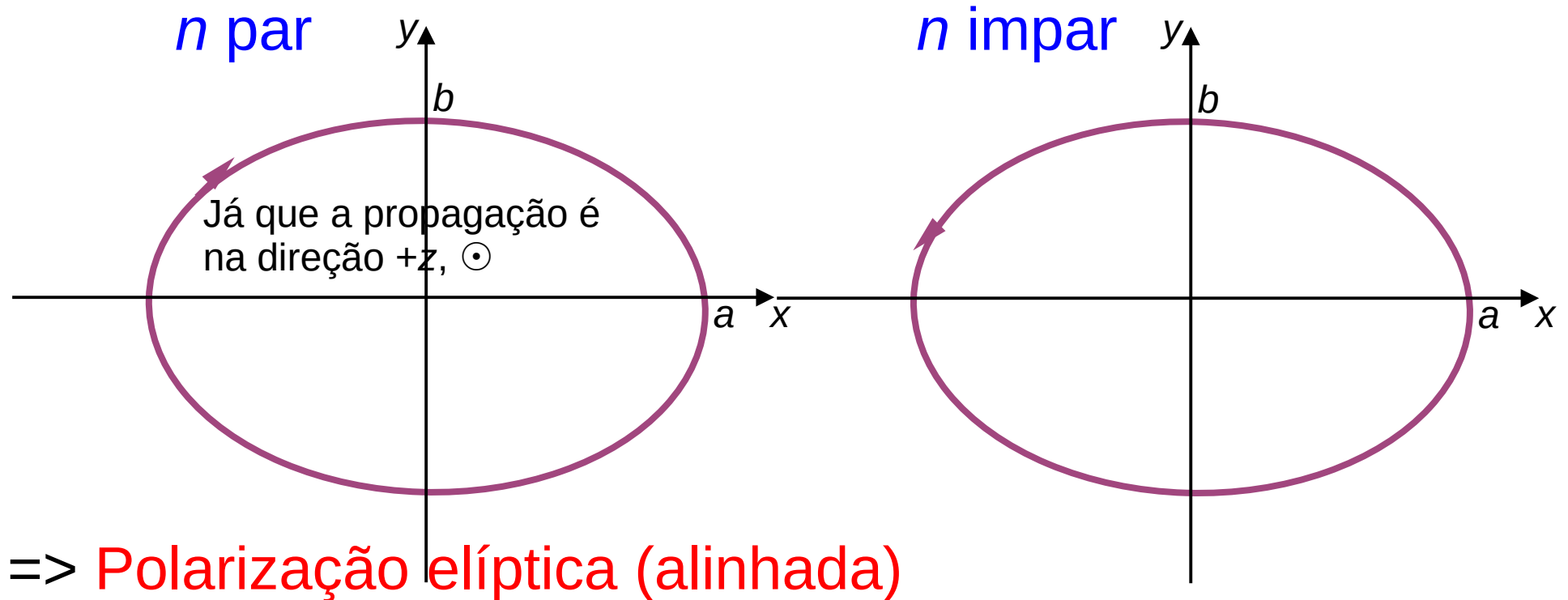
=> Polarização elíptica (horário ou a esquerda)

Polarização da Luz

Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \sin^2 \delta$$

Casos especiais: $\delta = (n+1/2) \cdot \pi$, mas $a \neq b$:
os eixos de **elipse** são **alinhados** com os eixos x e y .



=> **Polarização elíptica (alinhada)**

Polarização da Luz

Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \text{sen}^2 \delta$$

Casos especiais: $a = b$ e $\delta = (n+1/2) \cdot \pi$

$$\Rightarrow (E_y/a)^2 - 2(E_x/a)(E_y/a)0 + (E_x/a)^2 = 1$$

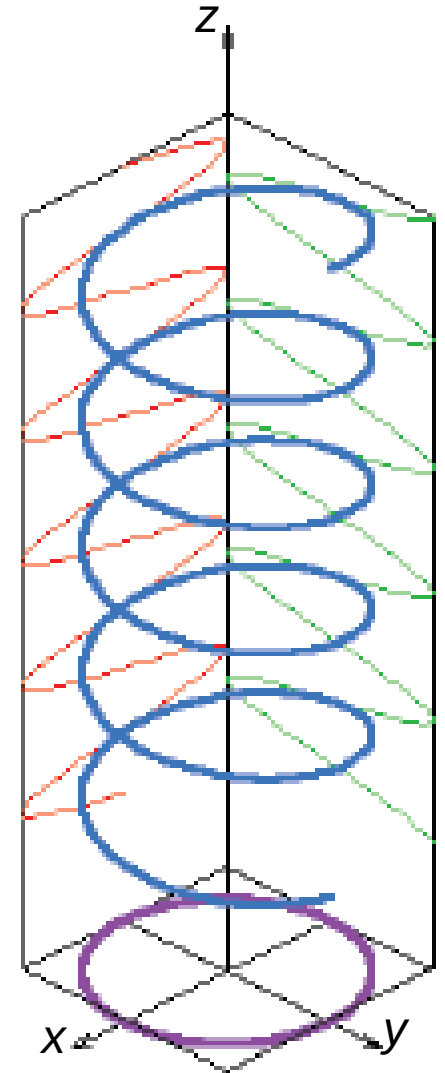
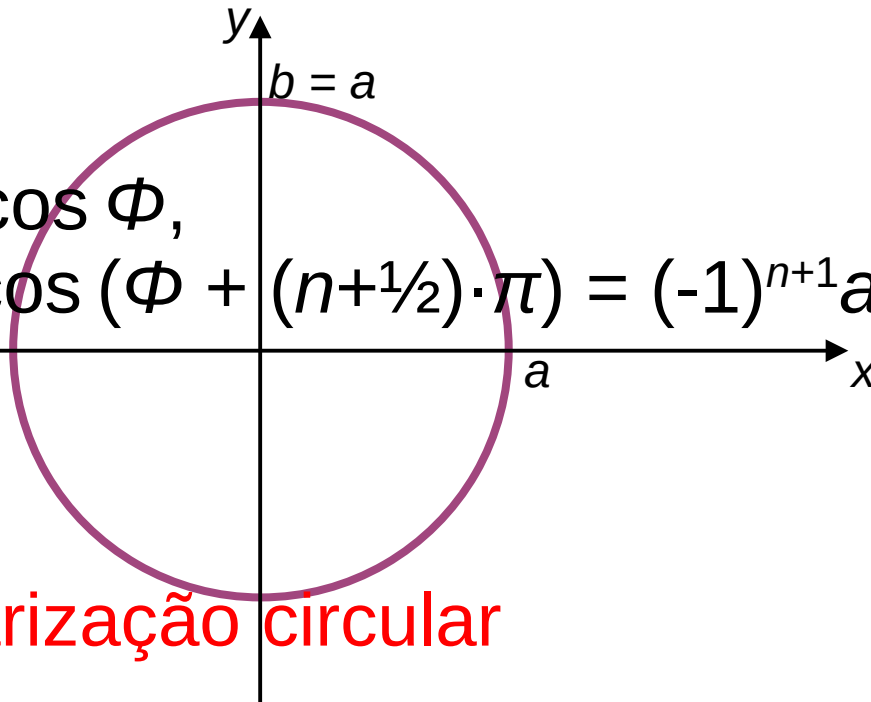
$$\Rightarrow E_y^2 + E_x^2 = a^2$$

ou

$$E_x = a \cdot \cos \phi,$$

$$E_y = a \cdot \cos (\phi + (n+1/2) \cdot \pi) = (-1)^{n+1} a \cdot \text{sen } \phi$$

\Rightarrow Polarização circular



Polarização da Luz

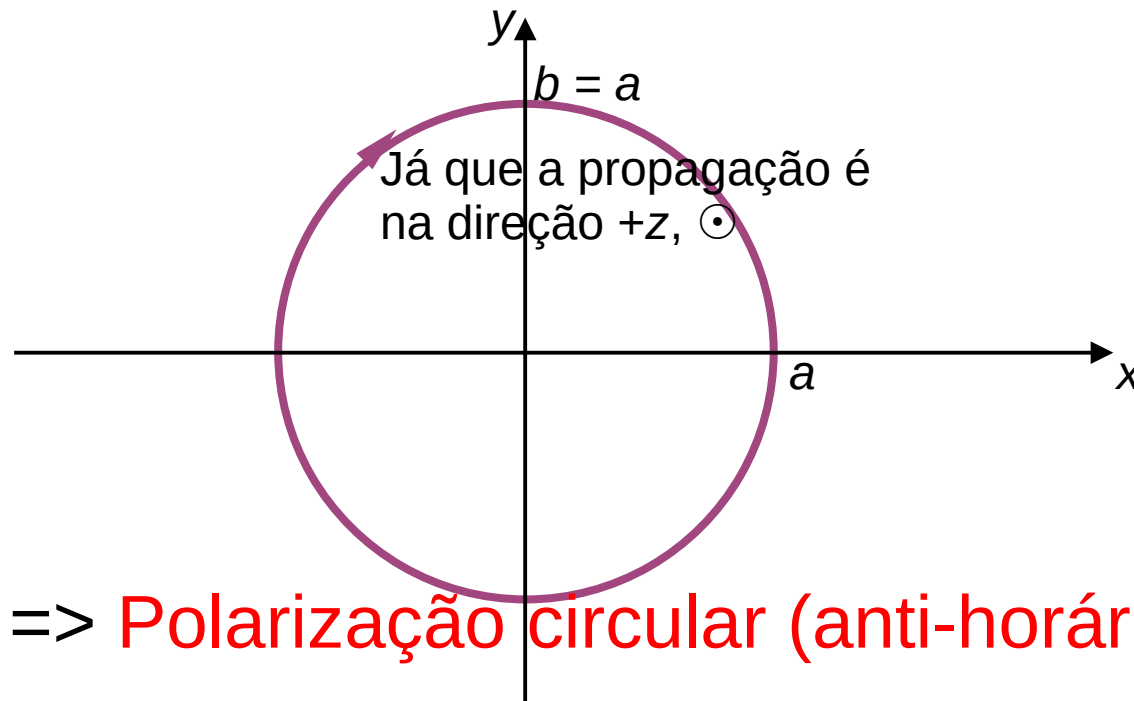
Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \text{sen}^2 \delta$$

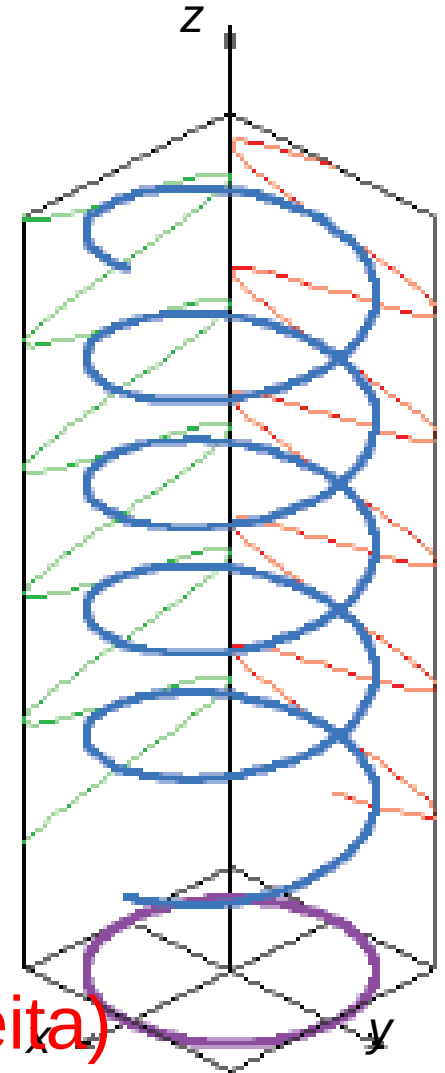
Casos especiais: $a = b$ e $\delta = (n+1/2) \cdot \pi$

$$E_x = a \cdot \cos \Phi, E_y = (-1)^{n+1} a \cdot \text{sen} \Phi$$

Já que $\Phi = -\omega t$, para n par, $E_y = a \cdot \text{sen} \omega t$



=> Polarização circular (anti-horário ou a direita)



Polarização da Luz

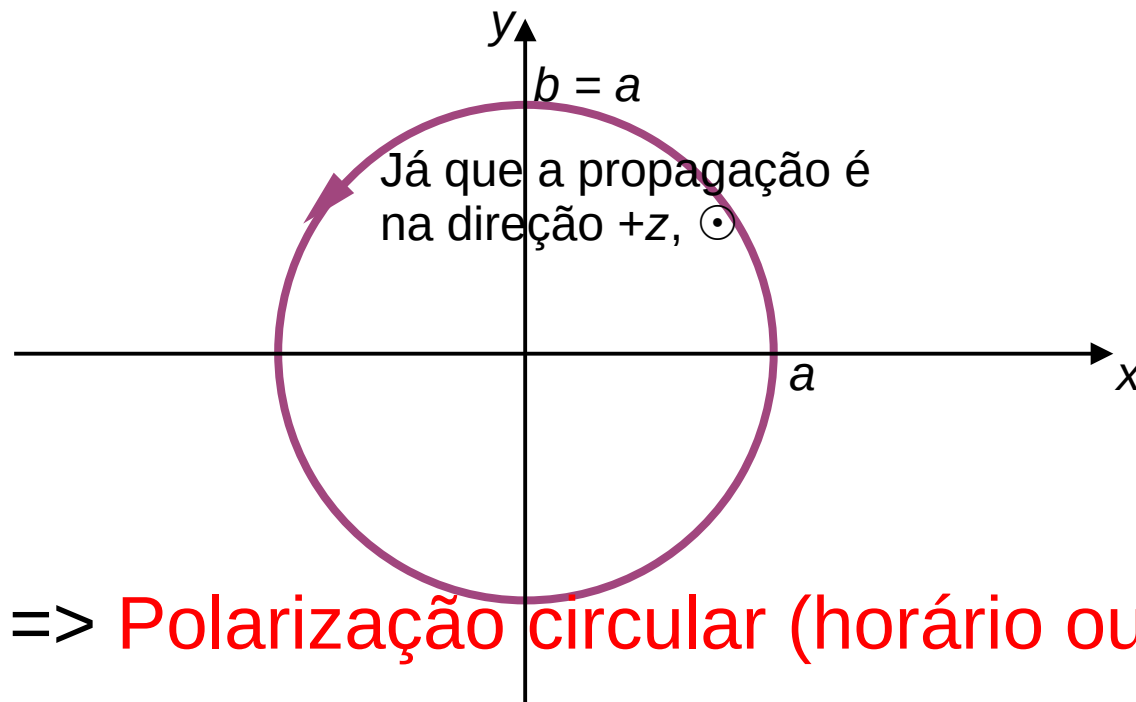
Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \sin^2 \delta$$

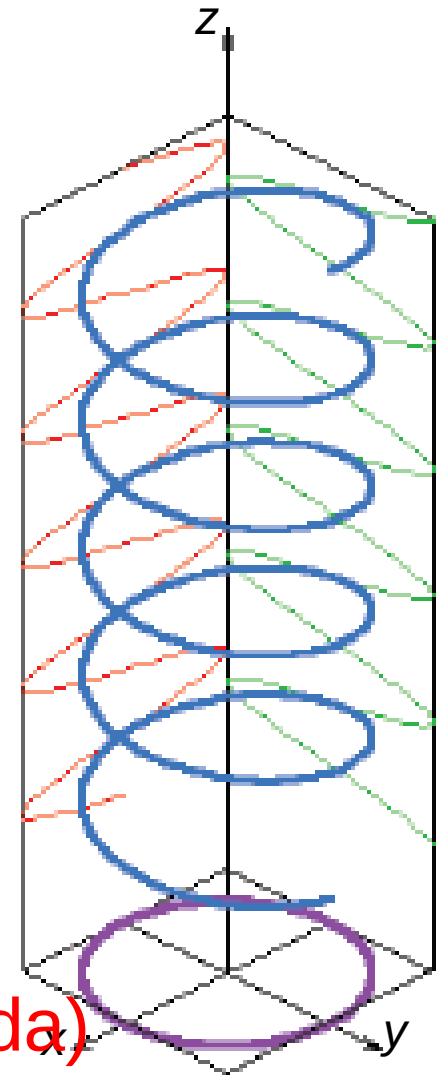
Casos especiais: $a = b$ e $\delta = (n+1/2) \cdot \pi$

$$E_x = a \cdot \cos \Phi, E_y = (-1)^{n+1} a \cdot \sin \Phi$$

Já que $\Phi = -\omega t$, para n ímpar $E_y = -a \cdot \sin \omega t$



=> Polarização circular (horário ou a esquerda)



Polarização da Luz

Formalismo

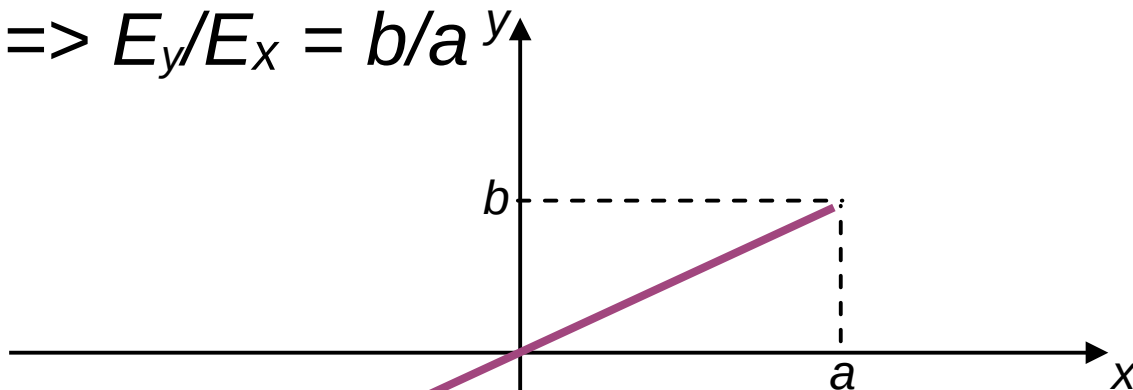
$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \text{sen}^2 \delta$$

Casos especiais: $\delta = n\pi \Leftrightarrow \varphi_y = \varphi_x + n\pi$

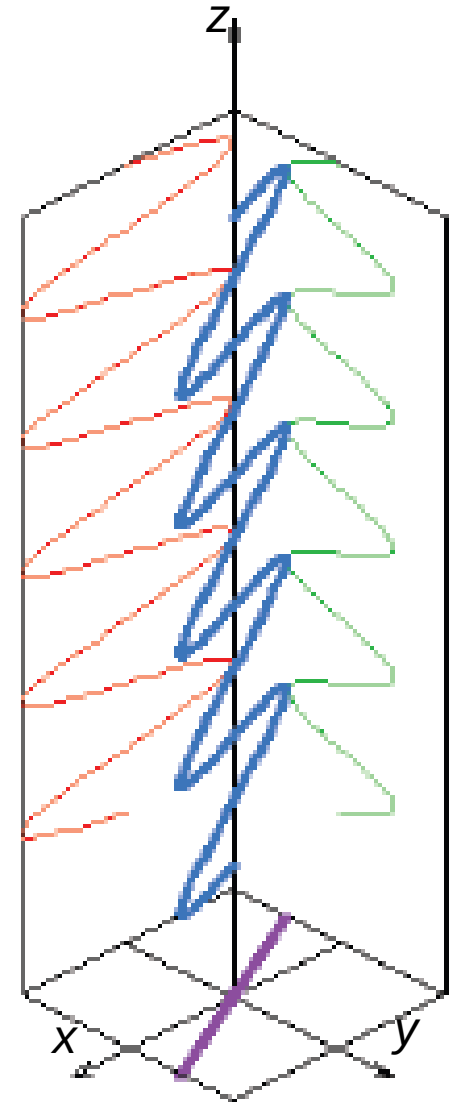
$$\Rightarrow (E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)(-1)^{n+1} + (E_x/a)^2 = 0$$

n par ($\delta = 0, \pm 2\pi, \pm 4\pi, \dots$): $(E_y/b - E_x/a)^2 = 0$

$$\Rightarrow E_y/E_x = b/a$$



\Rightarrow Polarização linear



Polarização da Luz

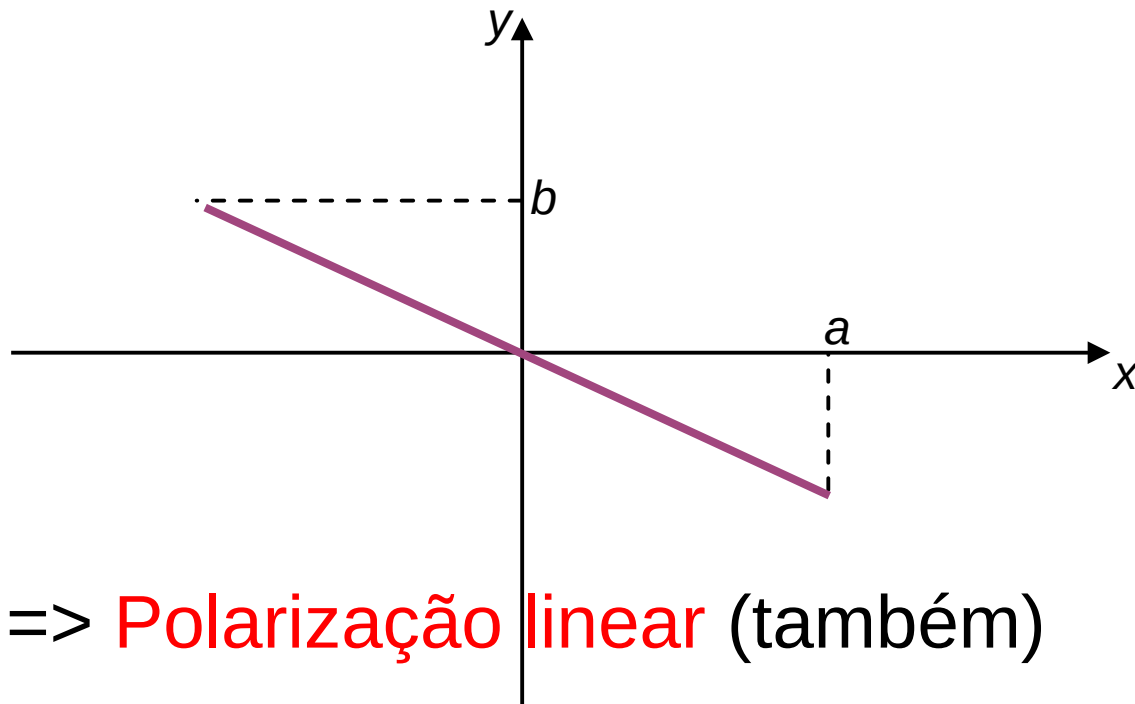
Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \text{sen}^2 \delta$$

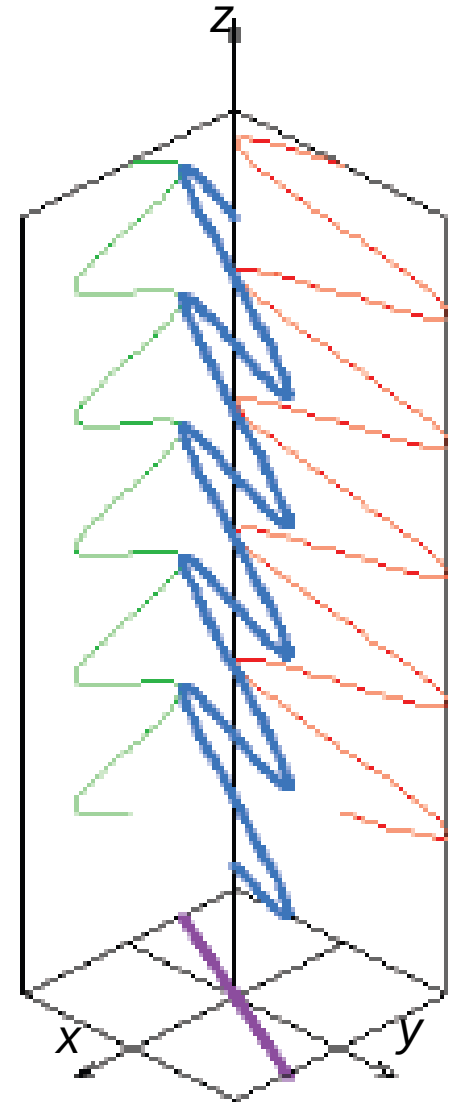
Casos especiais: $\delta = n\pi$, n ímpar

($\delta = \pm\pi, \pm3\pi, \dots$): $(E_y/b + E_x/a)^2 = 0$

$$\Rightarrow E_y/E_x = -b/a$$



\Rightarrow Polarização linear (também)



Polarização da Luz

Formalismo

$$(E_y/b)^2 - 2(E_x/a)(E_y/b)\cos \delta + (E_x/a)^2 = \text{sen}^2 \delta$$

Casos especiais: $\delta = n\pi$

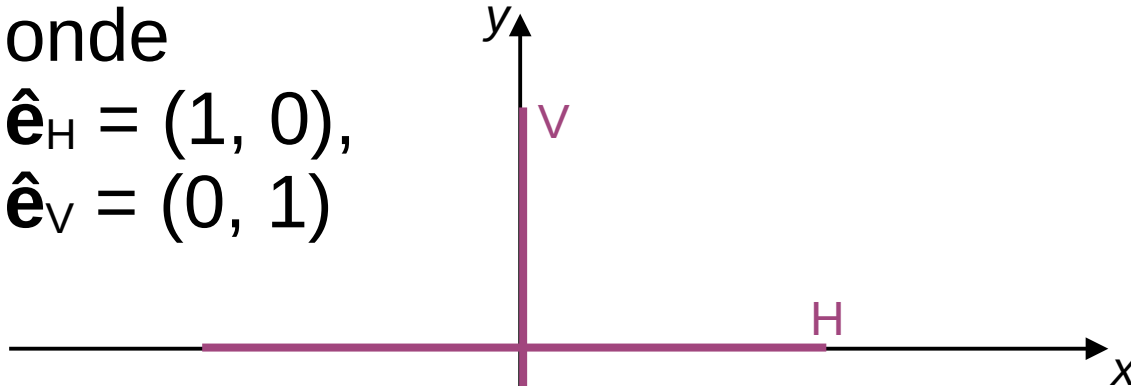
$b = 0$: $\mathbf{E} = (E_x, 0)$ ou $(E_{0H}, 0) = E_{0H}\hat{\mathbf{e}}_H$: polarização **horizontal** H

$a = 0$: $\mathbf{E} = (0, E_y)$ ou $(0, E_{0V}) = E_{0V}\hat{\mathbf{e}}_V$: polarização **vertical** V,

onde

$$\hat{\mathbf{e}}_H = (1, 0),$$

$$\hat{\mathbf{e}}_V = (0, 1)$$

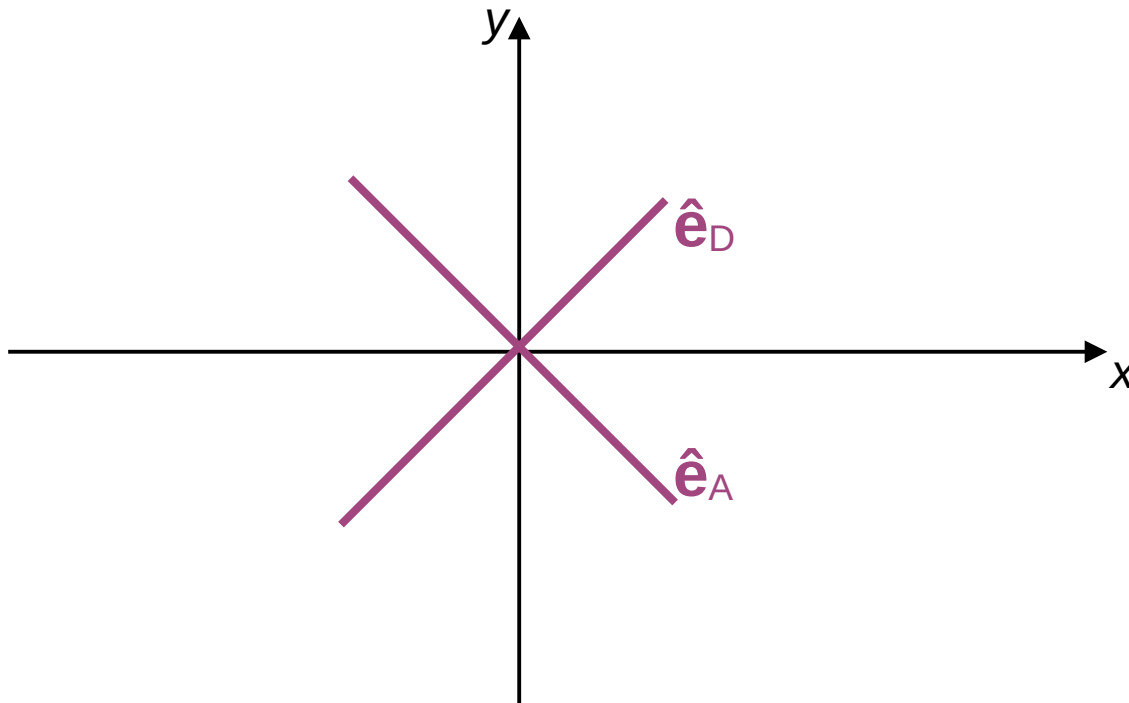


Qualquer polarização pode ser escrita como combinação de H e V, $\mathbf{E} = (E_{0H}, E_{0V}) = E_{0H}\hat{\mathbf{e}}_H + E_{0V}\hat{\mathbf{e}}_V$

Polarização da Luz

Formalismo

Muitas vezes é definida uma **base Diagonal-Antidiagonal**, $\hat{\mathbf{e}}_D = 1/\sqrt{2} \cdot (\hat{\mathbf{e}}_H + \hat{\mathbf{e}}_V) = (1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$,
 $\hat{\mathbf{e}}_A = 1/\sqrt{2} \cdot (\hat{\mathbf{e}}_H - \hat{\mathbf{e}}_V) = (1/\sqrt{2}, -1/\sqrt{2})$,
que também pode ser usada para escrever o campo.



Podemos expressar o **campo elétrico** como **vetores** nestas **bases**, chamadas **vetores de Jones**, e construir **operadores** para **mudança de base**, etc.

Polarização da Luz

Formalismo

Voltando pra **Polarização Circular**:

Podemos **interpretar** o **plano x-y** como o **plano complexo** (eixo real-eixo imaginário) e o **vetor** $\mathbf{E} = (E_x, E_y)$ como um **número complexo** $E = E_x + iE_y$.

Os **dois casos** de luz **circularmente polarizada** podem ser escritos como

- **anti-horário** ou **a direita**: $E_- = a \cdot e^{-i\phi} = a \cdot e^{i\omega t}$
- **horário** ou **a esquerda**: $E_+ = a \cdot e^{i\phi} = a \cdot e^{-i\omega t}$

Polarização da Luz

Formalismo

Definindo $\hat{\epsilon}_+ = 1/\sqrt{2} \cdot (1, i)$ e $\hat{\epsilon}_- = 1/\sqrt{2} \cdot (1, -i)$

$\mathbf{E}_+ = a \cdot e^{i\phi} \hat{\epsilon}_+ \equiv$ luz circularmente polarizada a esquerda

$\mathbf{E}_- = a \cdot e^{i\phi} \hat{\epsilon}_- \equiv$ luz circularmente polarizada a esquerda

Assim $\mathbf{E} = 1/\sqrt{2} \cdot (E_x - iE_y) \hat{\epsilon}_+ + 1/\sqrt{2} \cdot (E_x + iE_y) \hat{\epsilon}_-$

=> Uma **onda plana monocromática** pode ser representada como **superposição** de **ondas circularmente polarizadas** a esquerda e a direita.

Tanto $\hat{\mathbf{e}}_H$ e $\hat{\mathbf{e}}_V$, quanto $\hat{\mathbf{e}}_D$ e $\hat{\mathbf{e}}_A$, quanto $\hat{\epsilon}_+$ e $\hat{\epsilon}_-$ podem servir de **bases** para descrever a **polarização**.

Polarização da Luz

Polarização Linear

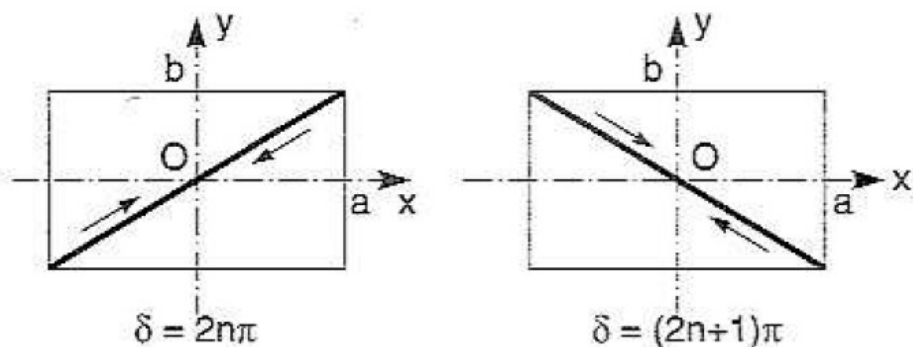


Fig. 5.1 Polarização linear

Polarização Circular

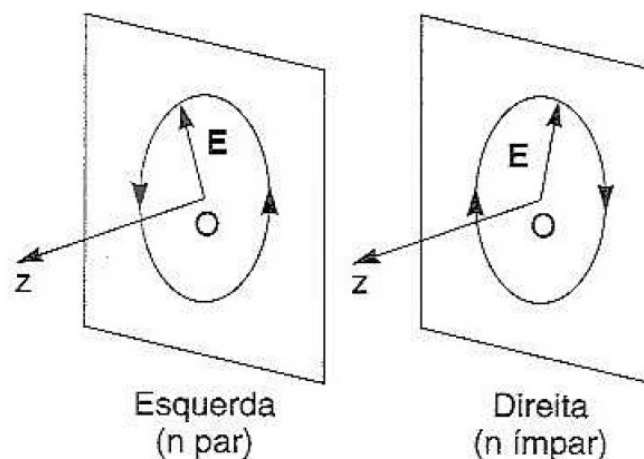


Fig. 5.2 Polarização circular

Polarização Elíptica

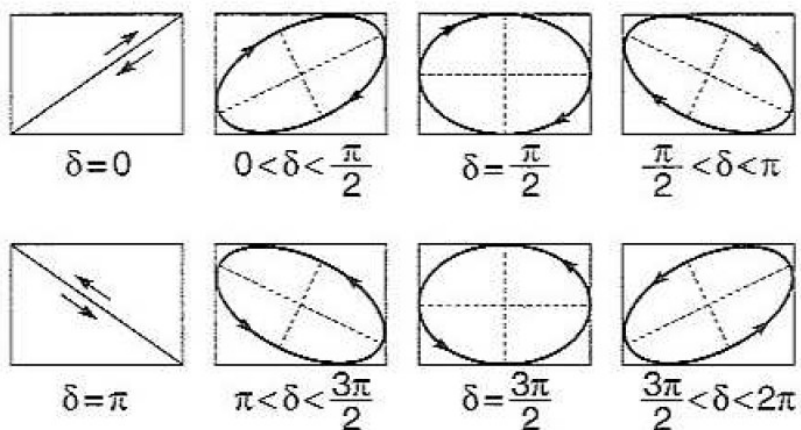


Fig. 5.3 Polarização elíptica

$$\begin{cases} \mathbf{E}_+ = a e^{i\Phi} \hat{\mathbf{e}}_+ = \text{luz circularmente polarizada } \textit{esquerda} \\ \mathbf{E}_- = a e^{i\Phi} \hat{\mathbf{e}}_- = \text{luz circularmente polarizada } \textit{direita} \end{cases}$$

Polarização da Luz

Luz Não Polarizada

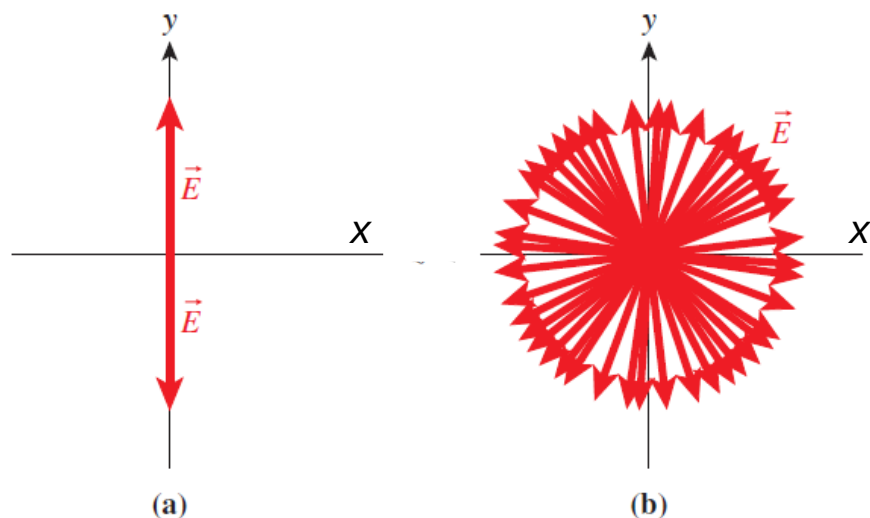


Figura 11.17 (a) Vetores campo elétrico no plano yz, definindo o plano de polarização como sendo o plano xy. (b) Vetores campo elétrico orientado segundo ângulos aleatórios.

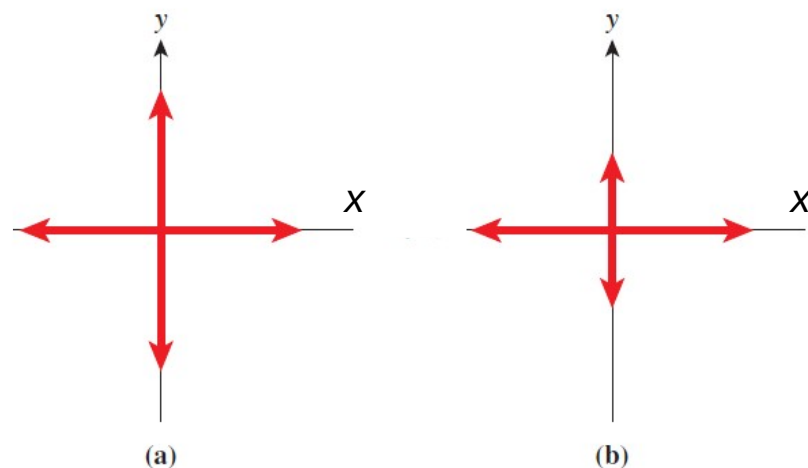


Figura 11.18 (a) Componentes resultantes de campo de luz parcialmente polarizada.

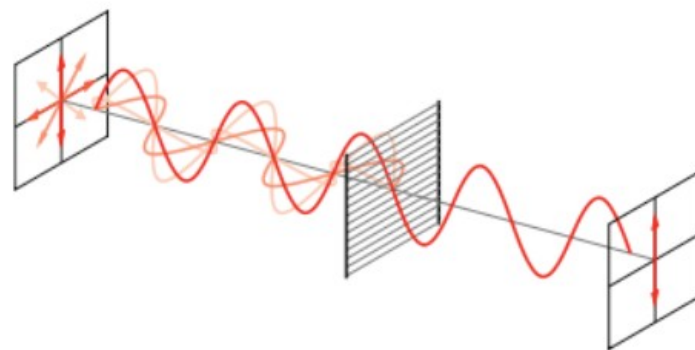
A maioria das fontes (Sol, lâmpadas incandescentes, ...) emite luz polarizada em direções alternado aleatoriamente, que se cancelam com o tempo. Caso há uma componente maior em uma dada direção, falamos de luz parcialmente polarizada.

Polarização da Luz

Polarizadores

Um **polarizador** é um tipo de "filtro" que **deixa passar** apenas luz com uma **dada componente de campo elétrico**.

Um tipo de material polarizador consiste de longas cadeias paralelas de moléculas compridas, que absorvem/ bloqueiam a componente paralela a elas, já que esta consegue causar o movimento de elétrons nesta direção, mas muito menos bem na direção perpendicular, tal que esta não é absorvida e passa. Para luz **inicialmente não polarizada**, o polarizador **reduz a intensidade pela metade**, $I = \frac{1}{2}I_0$.



Polarizador: Filtra (seleciona) uma polarização específica.

Polarização da Luz

Polarizadores

No caso de luz **já polarizada**, se o **vetor do campo elétrico E_0** com **módulo E_0** faz um **ângulo θ** com a **direção de polarização do polarizador**, "sobra" do **campo elétrico $\cos \theta \cdot E_0$** .

Já que a **intensidade** de uma onda eletromagnética é $I = \frac{1}{2}c\epsilon_0 E_{\max}^2 \propto E^2$, a intensidade cai pelo fator $\cos^2\theta$:

Lei de Malus: $I_\theta = I_0 \cos^2\theta$.

=> **Girando o polarizador**, consegue-se **determinar a polarização** de uma luz. Se usado para este fim, podemos chamar o polarizador de **analisador**.

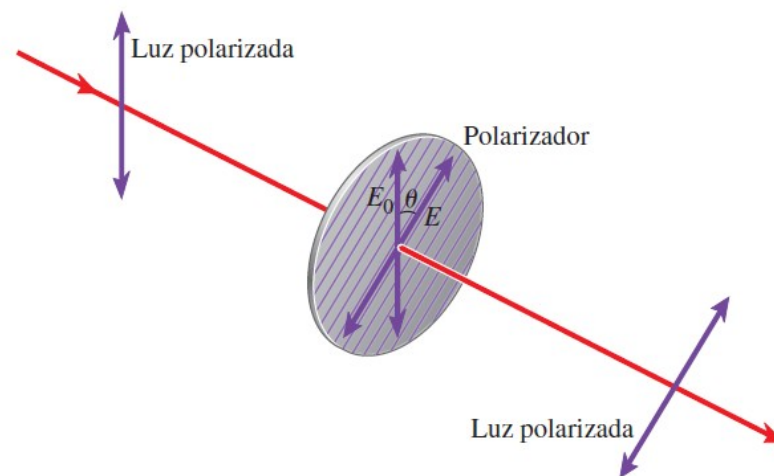


Figura 11.21 Luz polarizada atravessa um polarizador cujo ângulo de polarização não é paralelo e nem perpendicular à polarização da luz incidente.

Polarização da Luz

Polarizadores

Exemplo:

Caso I_θ **independe** de θ ,
 $I = \frac{1}{2}I_0$, podemos
concluir que a luz **não** é
polarizada (linearmente).

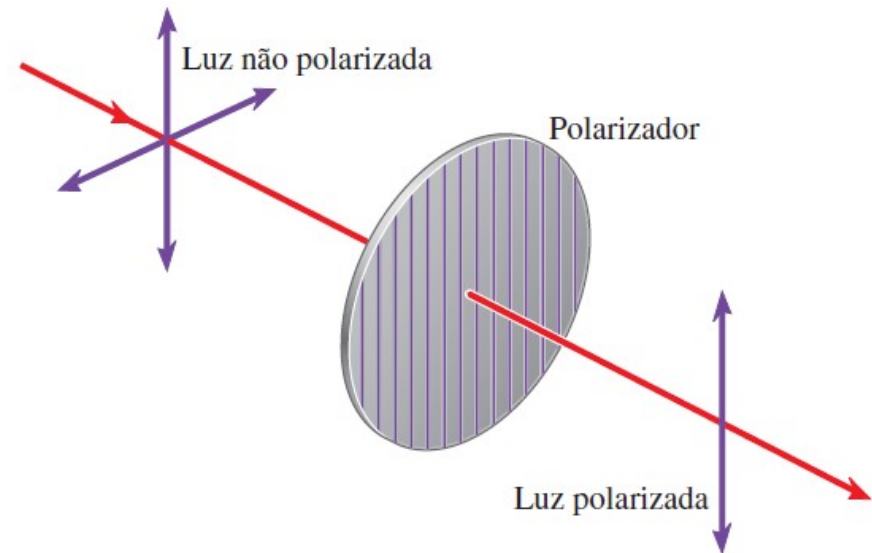


Figura 11.19 Luz não polarizada atravessa um polarizador vertical. Depois disso, ela está polarizada verticalmente.

Polarização da Luz

Polarizadores

Outro exemplo:

Se a **direção de polarização do analisador estiver paralela** à direção da **polarização da luz**, $\theta = 0^\circ$, **toda luz passa**,

$$I_\theta = I_0 \cos^2 \theta = I_0.$$

Se estiver **perpendicular**, $\theta = 90^\circ$, **toda luz é absorvida**,

$$I_\theta = I_0 \cos^2 \theta = 0.$$

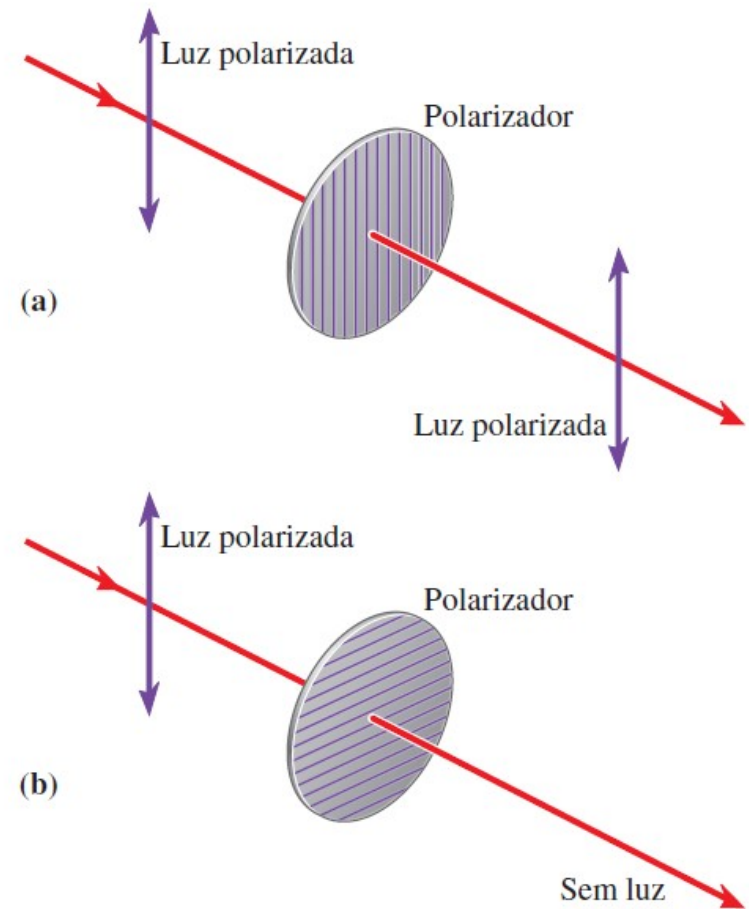
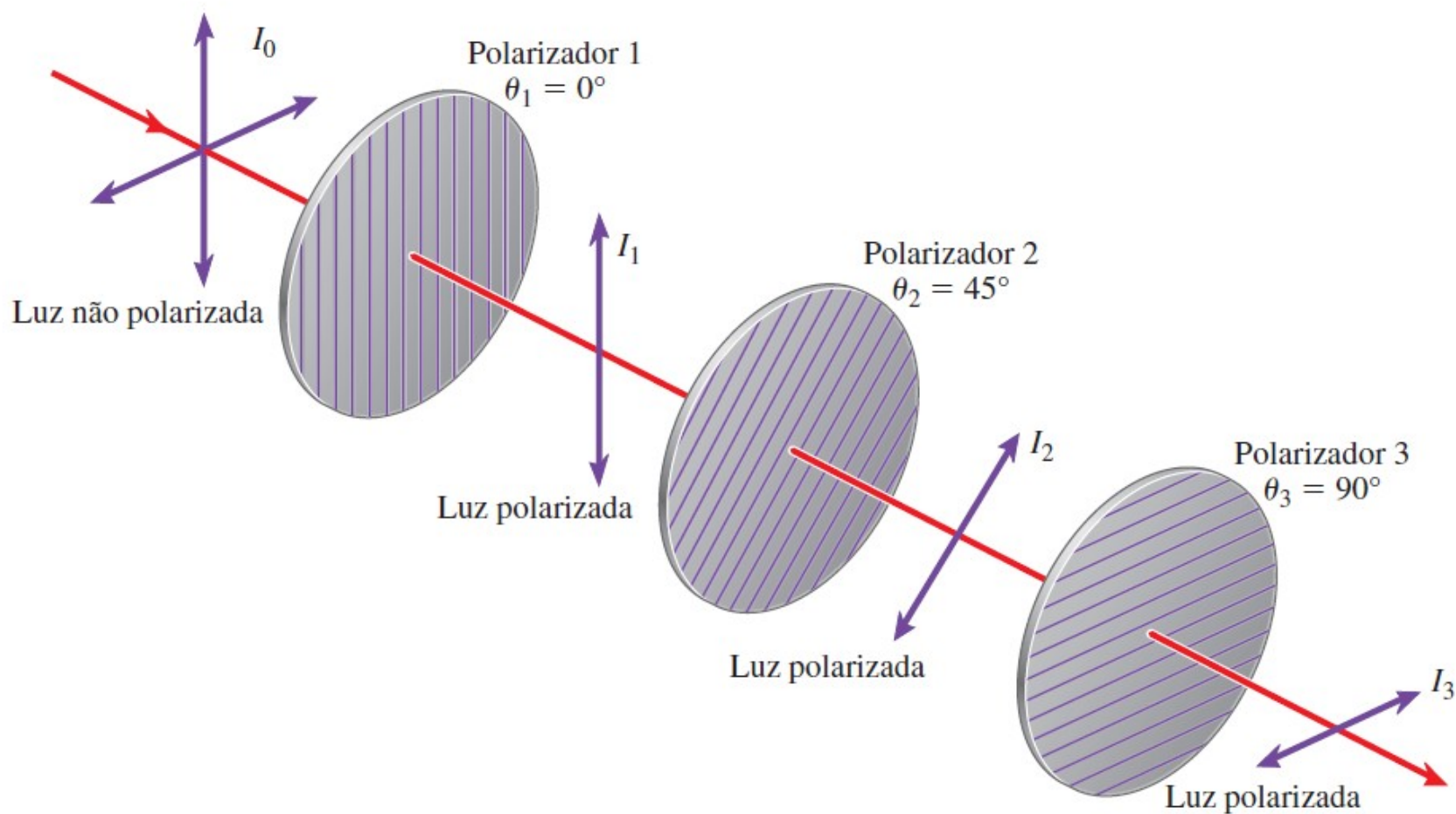


Figura 11.20 (a) Luz polarizada verticalmente incide em um polarizador vertical. (b) Luz polarizada verticalmente incide em um polarizador horizontal.

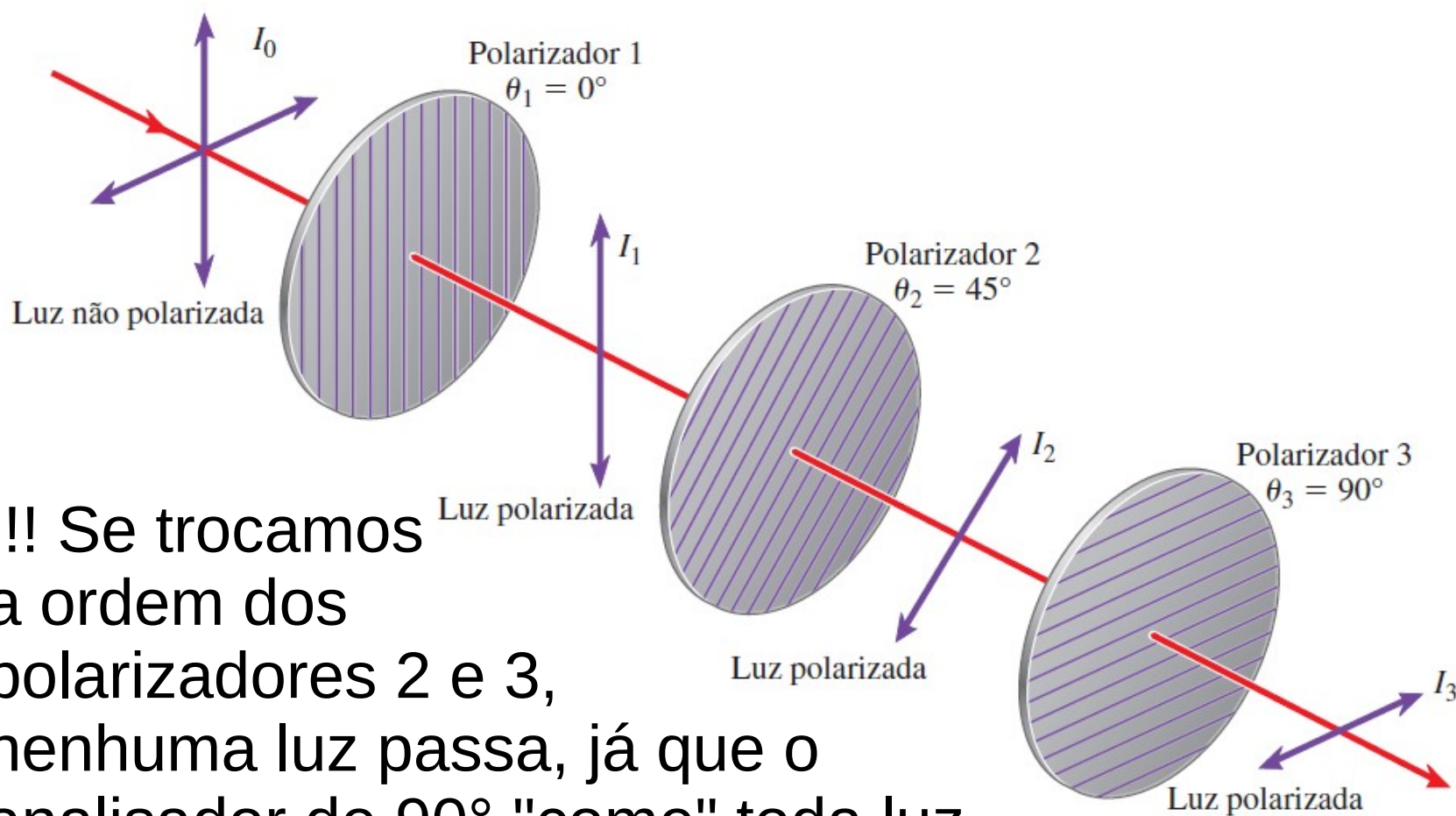
Polarização da Luz

Exercício: Qual é a intensidade da luz I_3 ?



Polarização da Luz

Exercício: Qual é a intensidade da luz I_3 ?



!!! Se trocamos a ordem dos polarizadores 2 e 3, nenhuma luz passa, já que o analisador de 90° "come" toda luz vindo do de 0° . => A **ordem** das **analisadores importa** !!!

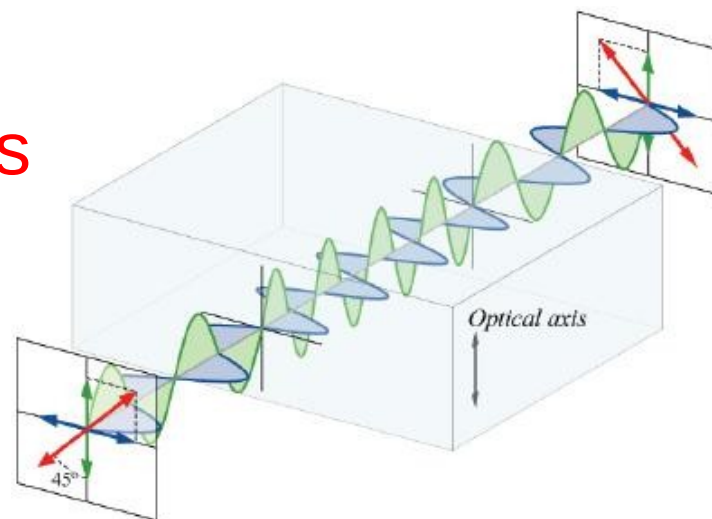
Polarização da Luz

Outros Tipos de Materiais que podem ser usados para Manipular a Polarização

Materiais Dicroicos (por exemplo o **polaroid**): **Absorvem diferentemente** duas **polarizações ortogonais lineares**.

Materiais Anisotrópicos (p. e. **certos cristais**): As **propriedades** variam com a **direção** em que a **luz propaga** através deles.

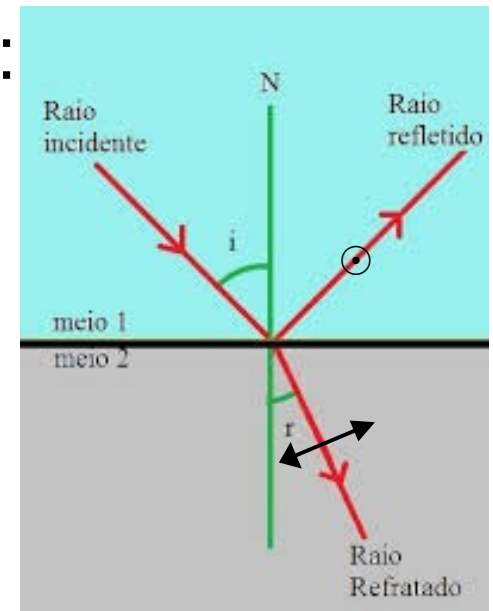
Birrefringência: **Diferentes polarizações** viajam através do material com **diferentes velocidades**. Podemos usar estes materiais para **mudar a polarização** da luz, chamadas **lâminas de retardo de meia onda** ou **quarto de onda**.



Polarização da Luz

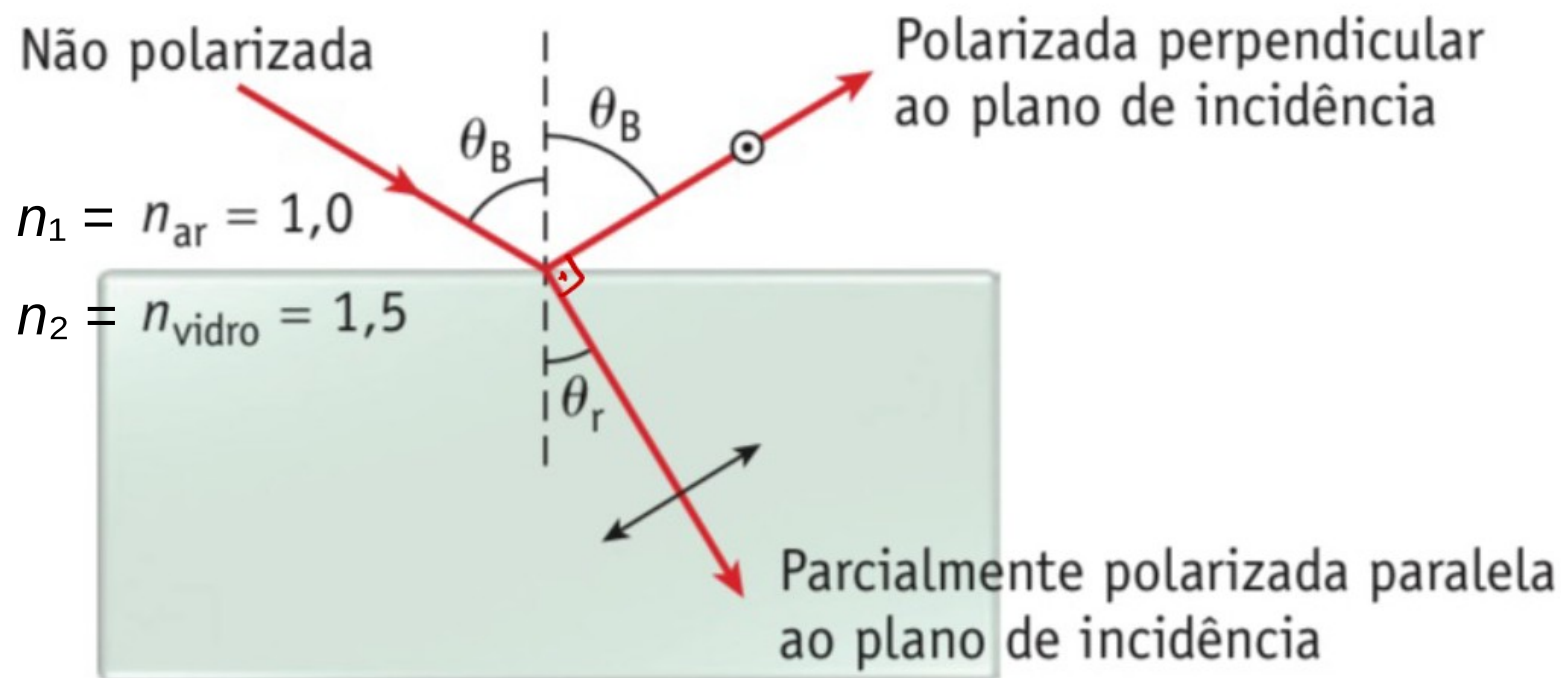
Polarização por Reflexão

Voltando à **transmissão e reflexão** (aula 2):
Quando uma **luz não polarizada** incide numa **superfície** entre dois meios, e parte é **transmitida** e outra parte, **refletida**, a **luz transmitida** é **parcialmente polarizada** na **direção do plano** estendido pelos **raios incidente e transmitida**, ou **plano de incidência** (aqui o plano da imagem), enquanto a **luz refletida** é **parcialmente polarizada** na **direção paralela à interface** (aqui \odot).



Polarização da Luz

Polarização por Reflexão



A **separação da componente paralela ao plano de incidência (a refletida)** é **total**, caso os **raios refletida e refratada** fazem um **ângulo de $\pi/2$** entre eles. Neste caso, o **ângulo de incidência** do raio incidente é chamado **ângulo de Brewster**, $\theta_i =: \theta_B$.

Polarização da Luz

Polarização por Reflexão

condição pro ângulo
de Brewster

Pela **Lei de Snell**: $n_1 \sen \theta_i = n_2 \sen \theta_r = n_2 \sen (\pi/2 - \theta_i)$
 $= n_2 [\sen \pi/2 \cos \theta_i - \sen \theta_i \cos \pi/2] = n_2 \cos \theta_i$
 $\Rightarrow n_2/n_1 = \sen \theta_i / \cos \theta_i = \tg \theta_i = \tg \theta_B$ **Lei de Brewster**

Em consequência, **luz refletida**, p.e., numa **superfície horizontal** (como a de um lago ou do mar) é **horizontalmente polarizada**.

Por isto, **óculos de sol** são frequentemente feito de **material polarizador**, **atenuando mais a luz refletida** por estas superfícies.

Polarização da Luz

Aplicações da Polarização

Dicroísmo circular: Wikipedia: (**CD**, do inglês *circular dichroism*) é uma forma de **espectroscopia** que faz uso da **absorção diferenciada** da **luz polarizada** no **sentido horário** ou no **sentido anti-horário**. Este fenômeno é rotineiramente utilizado no **estudo** da **estrutura secundária** de **proteínas**.

Materiais Polaroides: **Óculos escuros**, **Cinema 3D** (as imagens vistas pelos olhos esquerda e direita são polarizadas perpendicular uma a outra, e as duas lentes dos correspondentes óculos "3D" são polarizadores também perpendiculares uma a outra).

e **muitas outras**

Interferência

Fenômenos de Interferência da Luz

Resultado da **sobreposição** de **ondas**, como vimos na aula sobre física ondulatória.

Só que, no caso de **ondas eletromagnéticas**, as grandezas são **vetoriais**, e temos que levar em conta a **polarização** das **ondas** para entender os fenômenos.

Interferência

Interferência de Fenda Dupla

Quando **luz coerente** passa por **duas fendas**, as **ondas** provindas das duas **direções** farão **interferência construtiva** em **certas direções** e **destrutiva** em **outras**.

Colocando uma **tela** atrás, aparece um **padrão de interferência**.

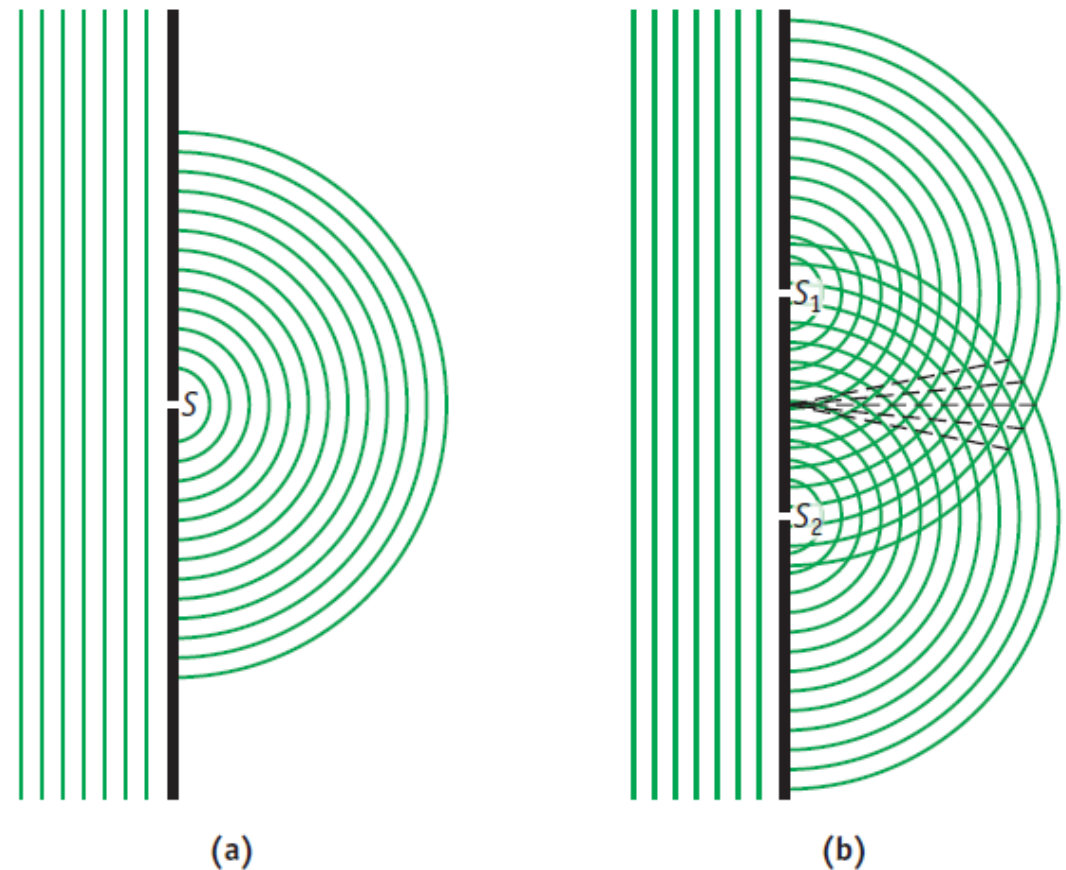


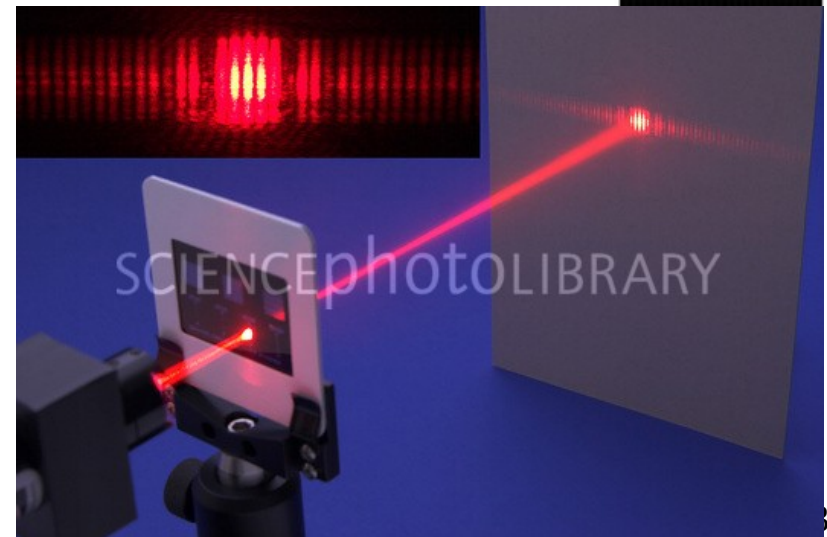
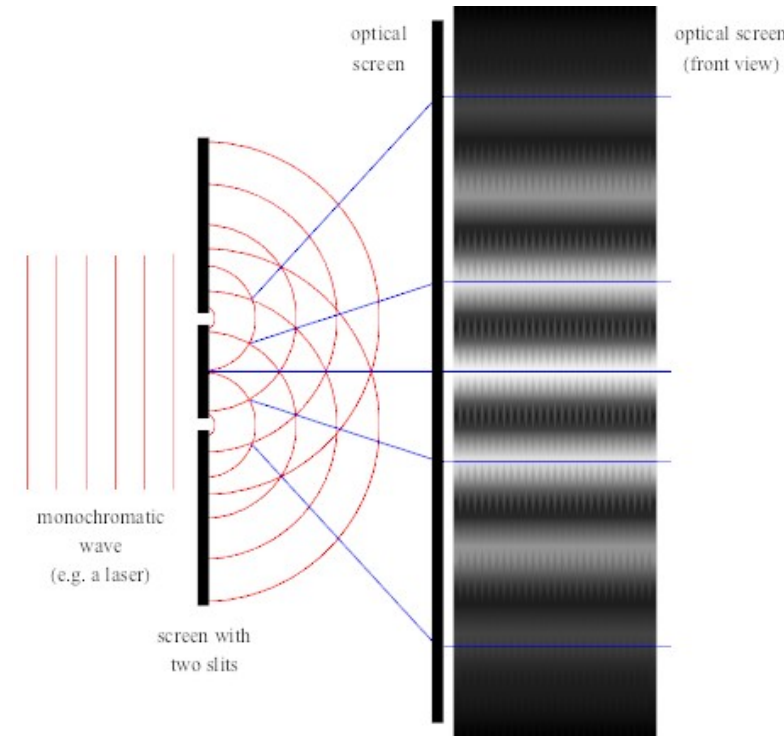
Figura 3.8 Construção de Huygens para ondas de luz coerente incidentes da esquerda em (a) uma fenda simples e em (b) fenda dupla, S_1 e S_2 . As linhas tracejadas representam linhas de interferência construtiva.

Interferência

A Experiência da Fenda Dupla

Esta situação pode ser gerada passando uma **luz monocromática** (i.e. um laser) por um **par de fendas** e colocando uma tela atrás.

Na tela aparece um **padrão de interferência** ou **difração**.



Interferência

Experimento de Young (1801)

Com este experimento, **Thomas Young** conseguiu **evidenciar a natureza ondulatória da luz** e determinar os **comprimentos de onda de luz de diferentes cores**.

Interferência de duas ondas
(melhor: uma separada em duas)
monocromáticas e coerentes.



Young (1773-1828)

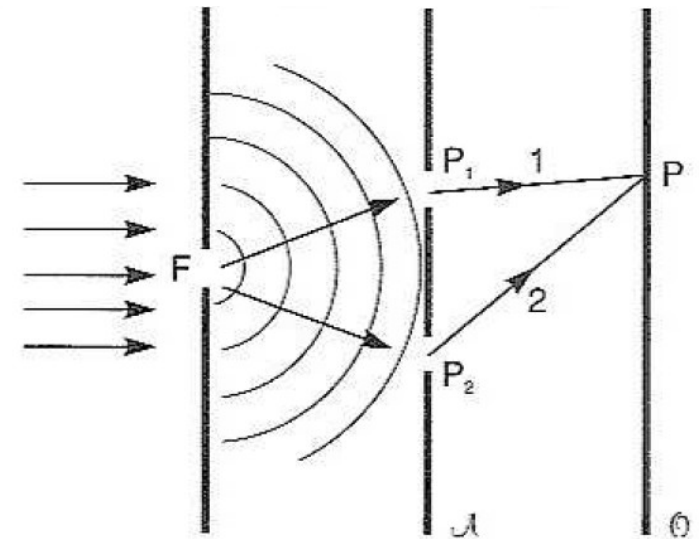


Fig. 3.1 Experimento de Young

Interferência

Experimento de Young

Quantificando as ondas como $E(\mathbf{x},t) = \text{Re}\{v(\mathbf{x})e^{-i\omega t}\}$, onde

- **onda plana**: $v(\mathbf{x}) = A \cdot e^{i\delta} \cdot e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}}$

$$\Rightarrow E(\mathbf{x},t) = A \cdot \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t + \delta)$$

- **onda esférica**: $v(\mathbf{x}) = A \cdot e^{i\delta} \cdot e^{ikr}/r$

$$\Rightarrow E(\mathbf{x},t) = A \cdot \cos(kr - \omega t + \delta)$$

$$I(\mathbf{x}) = |v(\mathbf{x})|^2$$

Superpondo as ondas 1 e 2:

$$E(\mathbf{x},t) = \text{Re}\{v_1(\mathbf{x})e^{-i\omega t} + v_2(\mathbf{x})e^{-i\omega t}\}$$

Já que $|e^{-i\omega t}| = 1$, o resultado não muda com este fator, e podemos deixá-lo:

$$I(\mathbf{x}) = |v(\mathbf{x})|^2 = |v_1(\mathbf{x}) + v_2(\mathbf{x})|^2 = \left| |v_1|e^{i\varphi_1} + |v_2|e^{i\varphi_2} \right|^2,$$

onde φ_1 e φ_2 são as **fases** das duas **ondas**.

Interferência

Experimento de Young

$$\begin{aligned} I(\mathbf{x}) &= ||v_1|e^{i\varphi_1} + |v_2|e^{i\varphi_2}|^2 = (|v_1|e^{i\varphi_1} + |v_2|e^{i\varphi_2})(|v_1|e^{i\varphi_1} + |v_2|e^{i\varphi_2}) \\ &= |v_1|^2 + |v_2|^2 + |v_1||v_2|[e^{i(\varphi_2-\varphi_1)} + e^{-i(\varphi_2-\varphi_1)}] \\ &= |v_1|^2 + |v_2|^2 + 2|v_1v_2|\cos(\varphi_2-\varphi_1) \quad \longleftarrow \text{Diferença de fase} \\ &= I_1 + I_2 + \underbrace{2\sqrt{I_1I_2} \cdot \cos(\varphi_2-\varphi_1)}_{\text{Termo de interferência}} \end{aligned}$$

Se $\varphi_2 - \varphi_1 = 2n\pi \Rightarrow I = (\sqrt{I_1} + \sqrt{I_2})^2$ Interferência construtiva

Se $\varphi_2 - \varphi_1 = (2n+1)\pi \Rightarrow I = (\sqrt{I_1} - \sqrt{I_2})^2$ " destrutiva

Em particular, se $I_1 = I_2 \Rightarrow I = 4I_1$ Interferência construtiva
0 " destrutiva

Interferência

Experimento de Young

No caso do experimento de Young no **ponto P**

(=> **princípio de Huygens**):

$$v(P) = v_1 + v_2$$

$$= A/r_1 \cdot e^{ikr_1} + A/r_2 \cdot e^{ikr_2},$$

onde $r_1 \equiv \overline{P_1P}$, $r_2 \equiv \overline{P_2P}$

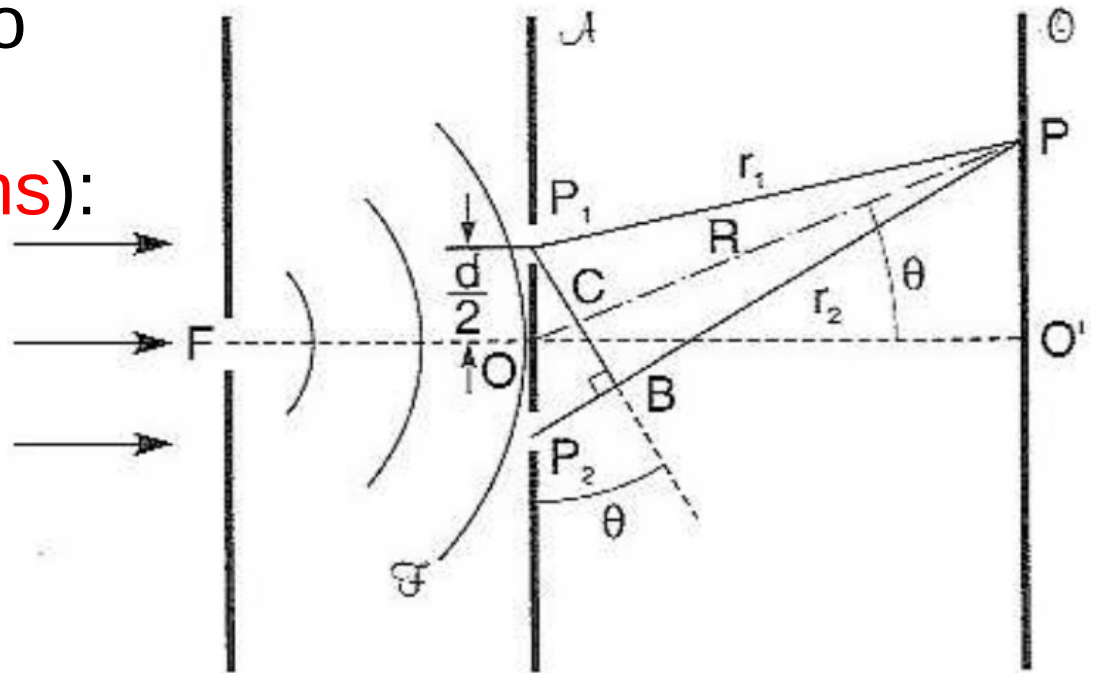
Chamando $R = \overline{PO}$

com $d \ll R$:

$$r_1 \approx R - d/2 \cdot \text{sen } \theta, \quad r_2 \approx R + d/2 \cdot \text{sen } \theta$$

$$\Rightarrow \varphi_2 - \varphi_1 = kd \cdot \text{sen } \theta \approx kd\theta$$

$$\Rightarrow I = 4I_1 \cos^2((\varphi_2 - \varphi_1)/2) = 4I_1 \cos^2(kd\theta/2)$$



Interferência

Análise do Experimento de Young

$$I = 4I_1 \cos^2(kd\theta/2)$$

=> **Espaçamento angular** entre **dois máximos** (ou **mínimos**):

$$\Delta\theta \approx 2\pi/kd = \lambda/d$$

Em uma **tela** na **distância L** :

$$L\Delta\theta \approx 2\pi L/kd = \lambda L/d$$

=> **máximos** em $n\lambda L/d$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$),

mínimos em $(n + 1/2)\lambda L/d$

de distância do **máximo central** do **padrão**

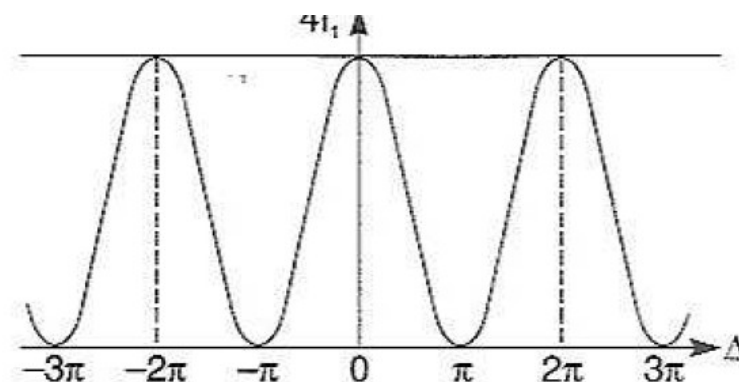


Fig. 3.7 Intensidade em função da defasagem

Interferência

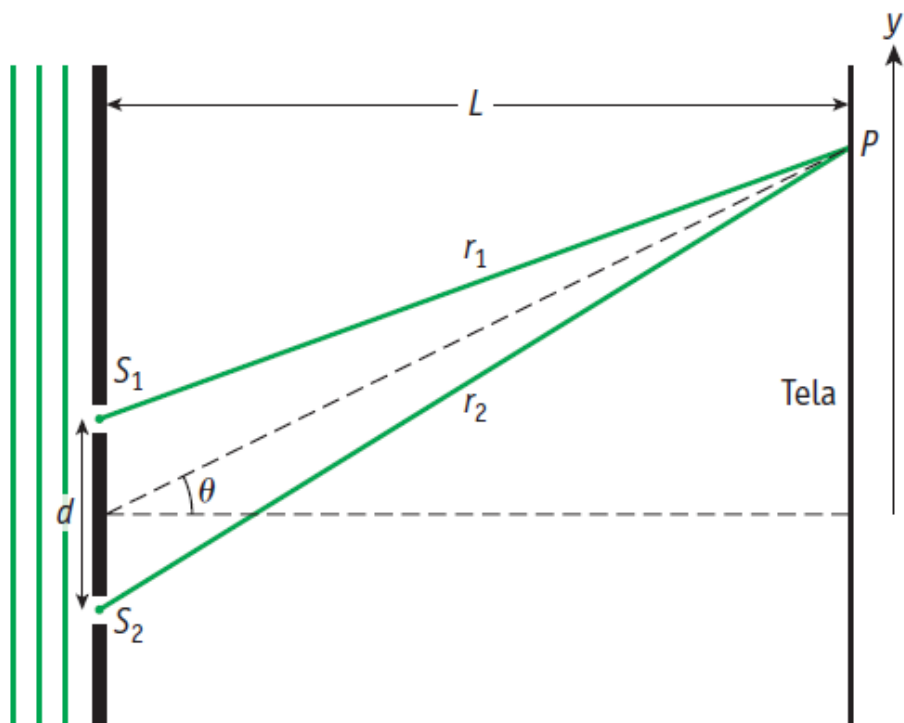


Figura 3.9 Vista expandida de luz coerente incidente sobre as duas fendas. As linhas verdes à direita das fendas representam a distância que a luz deve percorrer vinda de S_1 e S_2 para um ponto P sobre a tela.

$$\Delta x = d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \left(\begin{array}{l} \text{franjas iluminadas,} \\ \text{interferência construtiva} \end{array} \right).$$

$$\Delta x = d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \left(\begin{array}{l} \text{franjas escuras,} \\ \text{interferência destrutiva} \end{array} \right).$$

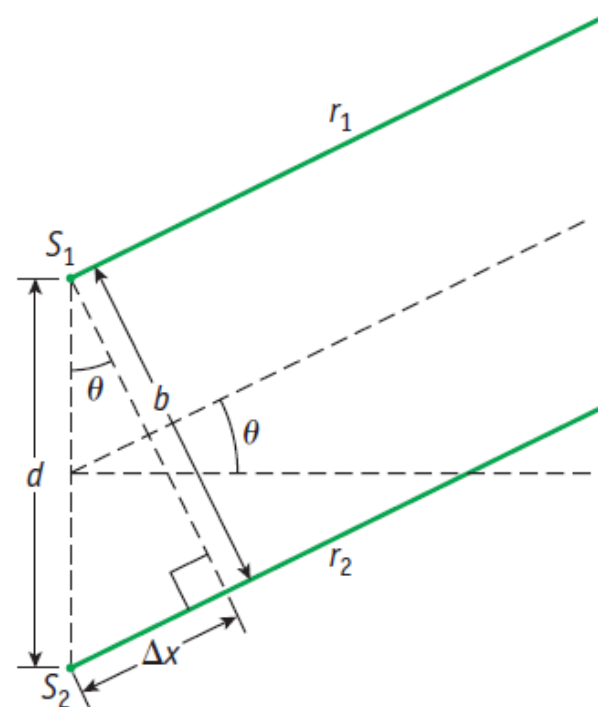
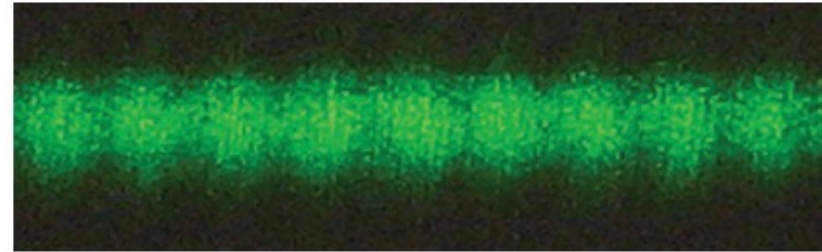


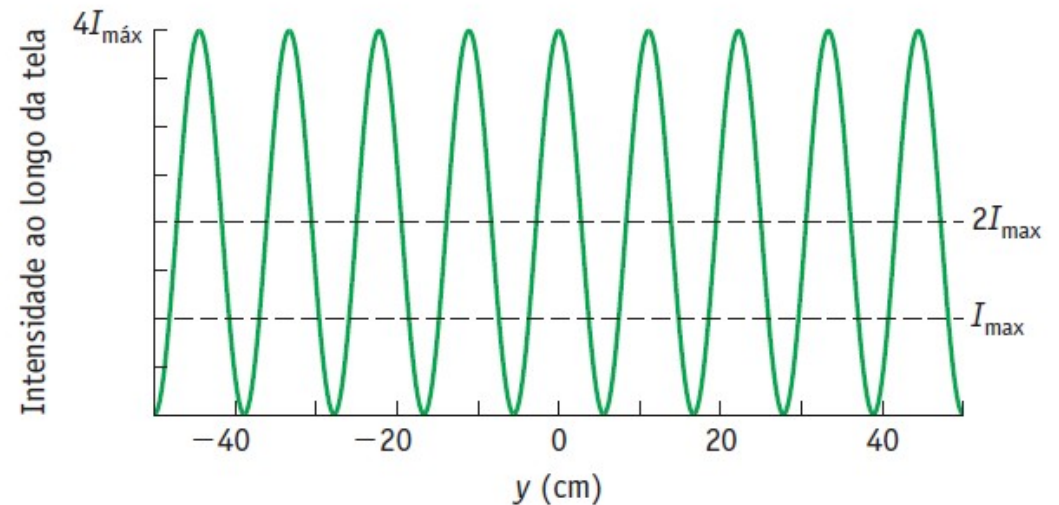
Figura 3.10 Vista ampliada das duas fendas, onde a tela é colocada longe o suficiente de forma que as linhas S_1P e S_2P sejam paralelas.

Interferência

Padrão de Interferência



(a)



(b)

Figura 3.12 Padrão de intensidade para interferência de duas fendas usando luz de comprimento de onda 550 nm incidente sobre duas fendas estreitas separadas por 10^{-5} m e a uma distância de 2 m da tela. (a) Fotografia da intensidade luminosa sobre a tela. (b) Cálculo da intensidade luminosa sobre a tela.

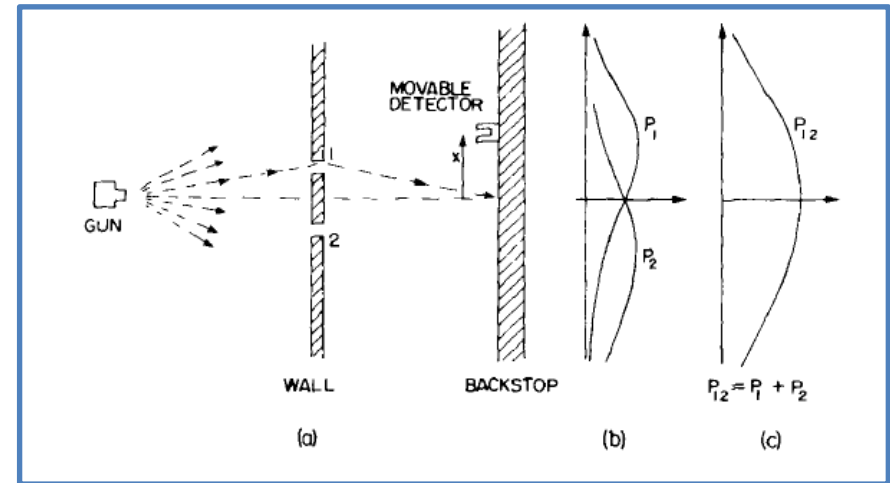
Interferência

A Experiência da Fenda Dupla

Interferência é um método muito eficiente de evidenciar o caráter ondulatório de um ente físico.

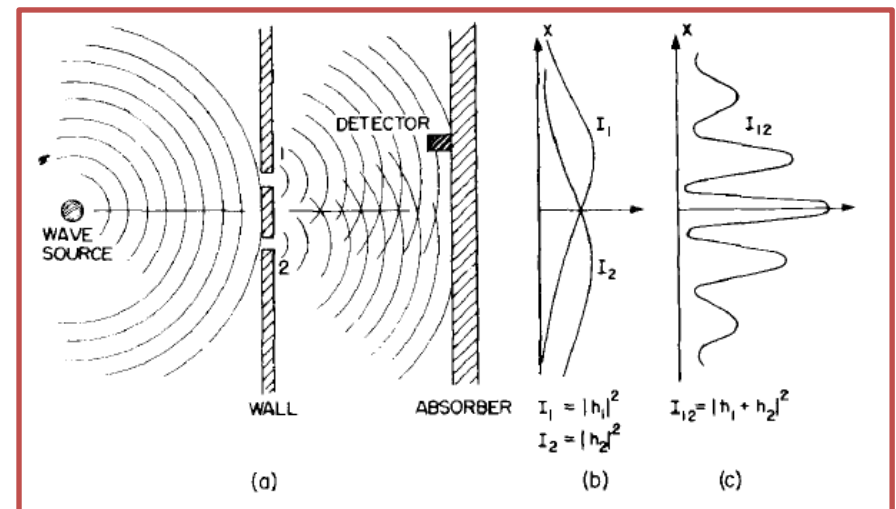
Partículas

$$\langle I \rangle = 2I_1$$



Ondas

alternando entre 0 e $4I_1$

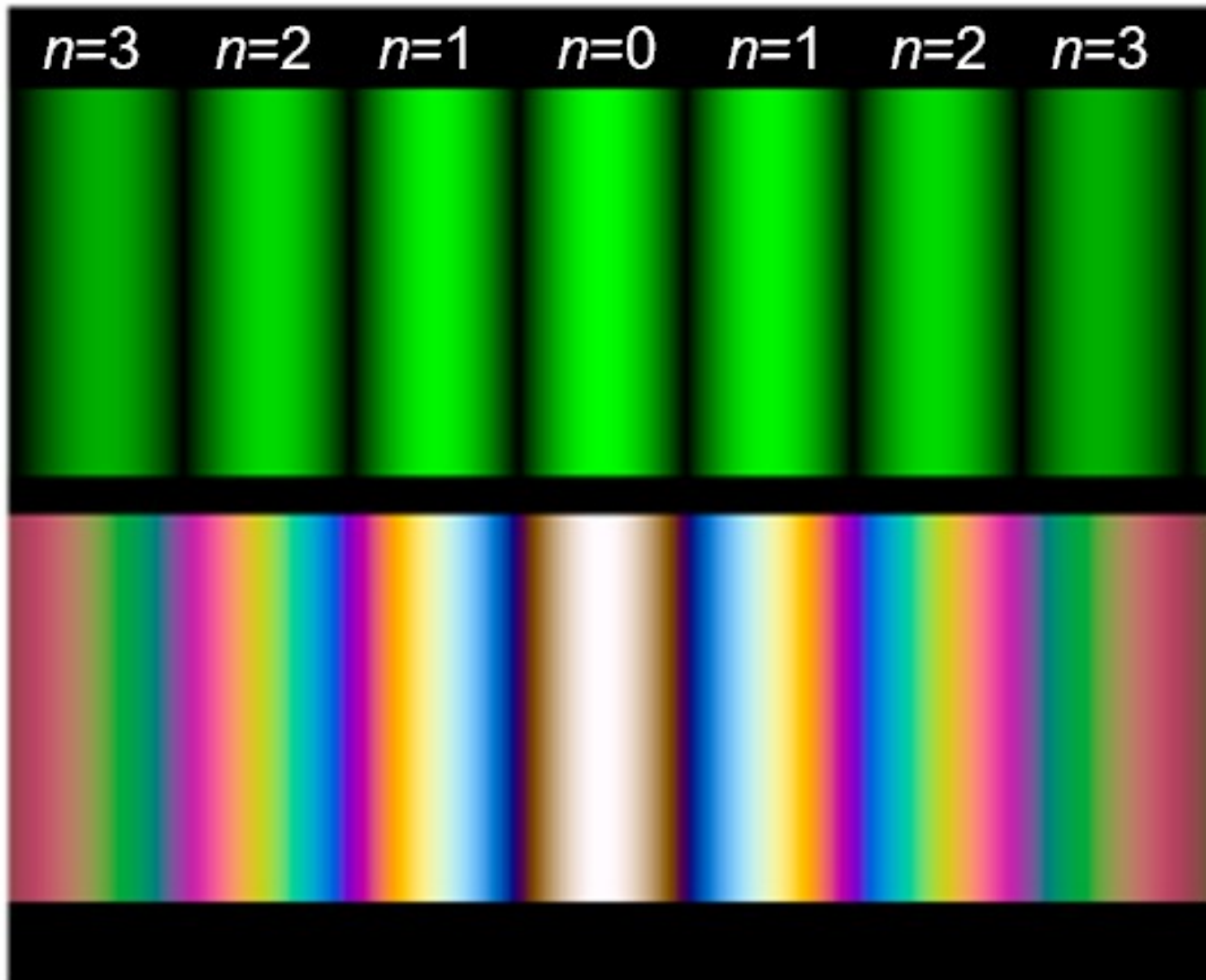


Interferência

Interferência com Luz Branca

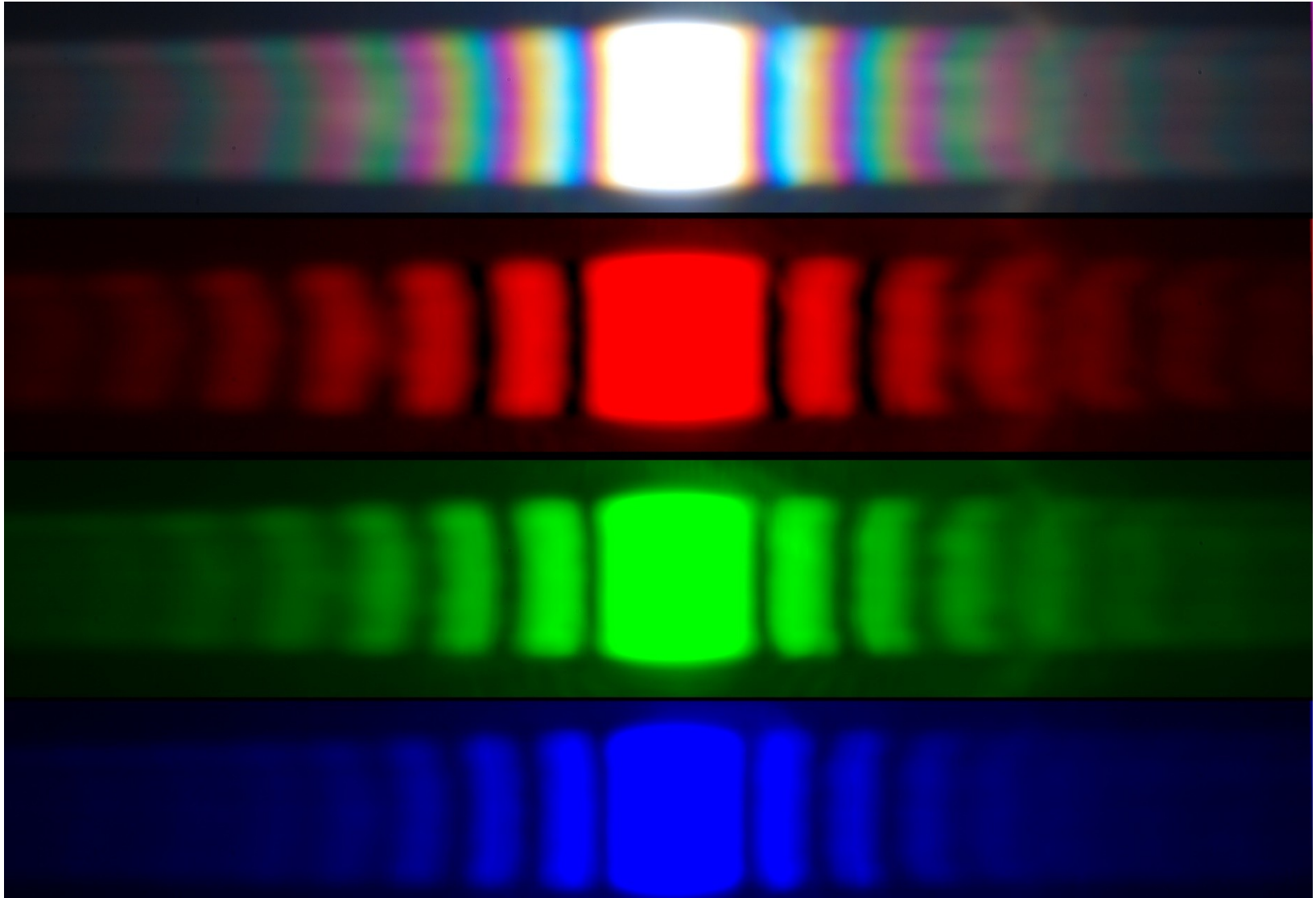
$$\Delta\theta \approx \lambda/d$$

=> Para **cada comprimento de onda (cor)** o **espaçamento entre os máximos é diferente.**



Interferência

Interferência em Diferentes Comprimentos de Onda.





Universidade Federal do ABC

Ótica e Relatividade

FIM PRA HOJE

