Interferência de ondas luminosas

2ª aula

* Vimos na aula anterior reflexão e refração de ondas eletromagnéticas $\Rightarrow \underbrace{\lambda \approx d}_{\text{difração}}$ e $\lambda \gg d$ (fonte puntiforme)

* Ótica geométrica { raios luminosos (espelhos, prismas, lentes, etc.)
* Ótica ondulatória { difração, interferência, polarização.

* Condições para ocorrer interferência:

1) As fontes devem ser coerentes $\Rightarrow$ manter a fase constante uma em relação à outra
2) As fontes devem ser monocromáticas $\Rightarrow$ emitir um único λ
3) Princípio de superposição deve ser aplicável.

Fontes Coerentes: Devem manter uma relação de fase cte

Método simples: 1 única fonte de luz monocromática que ilumine um anteparo com 2 $\underbrace{\text{aberturas pequenas (fendas)}}_{\text{separa-se o feixe em 2 partes}}$

* Experiência da Fenda dupla de Young

Thomas Young (1801) $\Rightarrow$ TRANPARÊNCIA 1

$S_0 \equiv$ fenda estreita

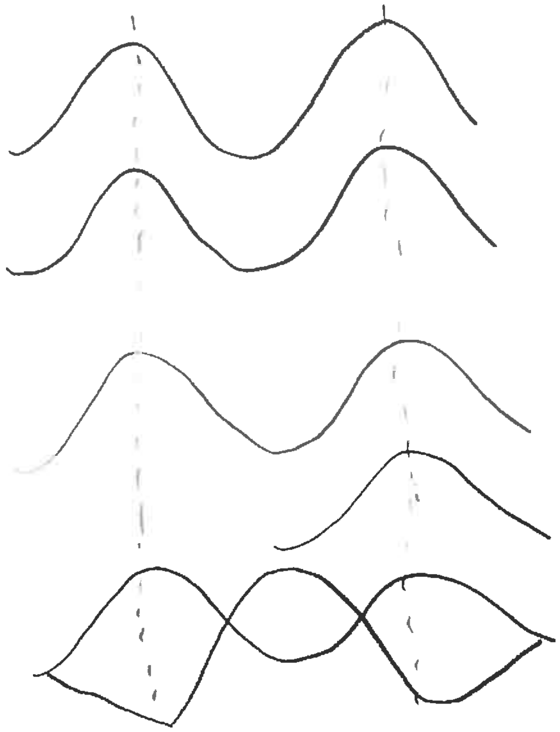
S_1 e $S_2 \equiv$ agem como fontes luminosas coerentes.

Aparecem as franjas de interferência

Interferência construtiva $\Rightarrow$ franja brilhante.

Interferência destrutiva $\Rightarrow$ franja escura.

Transparência 2



(a) Ondas se combinam em P construtiva.

(b) ondas principiam em fase, mas a onda de cima tem que percorrer 1 comprimento de onda a mais para atingir Q ⇒ como o atraso é de 1 comprimento ⇒ atingem Q em fase

(c) a onda de cima atrasou 1/2 comprimento de onda ⇒ interferência destrutiva em R

* Relações quantitativas da experiência de Young

Transparência 3 ⇒ diferença de percurso

$$\delta = r_1 - r_2 = d \operatorname{sen}\theta \qquad r_1 \text{ e } r_2 \approx \text{paralelos}$$

isso ocorre quando $L >> d$

A diferença de percurso irá determinar se as ondas estarão em fase ou não.

* A interferência é construtiva quando:

$$\delta = d \operatorname{sen}\theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \text{etc.})$$

$m \equiv$ ordem da franja

$m = \pm 1 \equiv$ máximo de 1ª ordem

$m = \pm 2 \equiv$ máximo de 2ª ordem

* A interferência é destrutiva quando:

$$\delta = d \operatorname{sen}\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \text{etc.})$$

múltiplo ímpar de $\lambda/2$

* Em geral $L >> d$ e $d >> \lambda$ ($L \sim 1m$; $d \sim 1mm$ e $\lambda \sim$ fração de μm

Nestas condições θ é pequeno

$$\operatorname{sen}\theta \approx \operatorname{tg}\theta = \frac{y}{L}$$ Transparência 3

* Interferência construtiva (franja brilhante)

$$d\operatorname{sen}\theta = m\lambda \qquad \left(\frac{Y_{brilh}}{L}\right)d = m\lambda \Rightarrow \boxed{Y_{brilh} = \frac{m\lambda L}{d}}$$

Forma de medir λ.

* Interferência destrutiva (franja escura)

$$d\operatorname{sen}\theta = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda \Rightarrow \left(\frac{Y_{esc}}{L}\right)d = \left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda \Rightarrow \boxed{Y_{esc} = \frac{\left(m+\frac{1}{2}\right)\lambda L}{d}}$$

- Exemplo 1: $L = 1{,}2\,m$; $d = 0{,}03\,mm$ e $m = 2$

Está a 4,5 cm da linha central (franja brilhante)

(a) Determinar o comprimento de onda da luz

$$Y_{brilh} = \frac{m\lambda L}{d} \Rightarrow Y_{brilh} = \frac{2 \times \lambda \times 1{,}2}{0{,}03 \times 10^{-3}} = 4{,}5 \times 10^{-2}$$

$$\lambda = \frac{0{,}03 \times 4{,}5 \times 10^{-5}}{2 \times 1{,}2} = 5{,}62 \times 10^{-7}\,m = 0{,}562\,\mu m$$

562 nm

T4A

COR? amarelo!

Mostrar as cores $\Rightarrow$ TRANSPARÊNCIA 4

(b) Calcular a distância das franjas brilhantes transparentes

$$Y_{m+1} - Y_m = \frac{(m+1)\lambda L}{d} - \frac{m\lambda L}{d} = \frac{\lambda L}{d} = 2{,}25\,cm$$

- Exemplo 2: $\lambda_1 = 430\,nm$; $\lambda_2 = 510\,nm$; $L = 1{,}5\,m$; $d = 0{,}025\,mm$ e $m = 3$

COR? azul — COR? verde

Separação entre as franjas? brilhantes de 3ª ordem?

$$Y_{3(1)} = \frac{m\lambda_1 L}{d} = \frac{3 \times 430 \times 10^{-9} \times 1{,}5}{0{,}025 \times 10^{-3}} = 7{,}74 \times 10^{-2}\,m$$

$$Y_{3(2)} = \frac{m\lambda_2 L}{d} = \frac{3 \times 510 \times 10^{-9} \times 1{,}5}{0{,}025 \times 10^{-3}} = 9{,}18 \times 10^{-2}\,m$$

$$\Delta Y = 9{,}18 \times 10^{-2} - 7{,}74 \times 10^{-2} = 1{,}44\,cm$$

* Distribuição de Intensidades

(na figura de interferência de dupla fenda)
associada à figura de interferência

$E_1 = E_0 \operatorname{sen} \omega t$
$E_2 = E_0 \operatorname{sen}(\omega t + \phi)$ } superposição vetorial de 2 ondas

- mesma frequência angular $\equiv \omega$
- diferença de fase $= \phi$
- mesma amplitude $= E_0$

A diferença de fase ϕ depende da diferença de percurso

$$\delta = r_2 - r_1 = d \operatorname{sen}\theta$$

Para diferença de percurso de $\lambda \Rightarrow$ 2π rad
interferência construtiva   diferença de fase

δ qquer $\Rightarrow \phi$

$$\frac{\lambda}{\delta} = \frac{2\pi}{\phi}$$

Para diferença de percurso de $\frac{\lambda}{2} \Rightarrow \pi$ rad
interferência destrutiva

δ qquer $\Rightarrow \phi$

$$\frac{\lambda}{2\delta} = \frac{\pi}{\phi} \Rightarrow \boxed{\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} d \operatorname{sen}\theta}$$

transparência

* Princípio da Superposição

$$E_P = E_1 + E_2 = E_0 \left(\operatorname{sen}\omega t + \operatorname{sen}(\omega t + \phi)\right)$$

$$\operatorname{sen} A + \operatorname{sen} B = 2 \operatorname{sen}\left(\frac{A+B}{2}\right)\cos\left(\frac{A-B}{2}\right)$$

$A = \omega t + \phi$
$B = \omega t$

$$\boxed{E_P = 2E_0\left(\cos\frac{\phi}{2}\right)\operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)}$$

Se $\phi = 0, 2\pi, 4\pi \Rightarrow E_P = 2E_0$!! $\Rightarrow$ coerente $\Rightarrow$ interferência construtiva
Se $\phi = \pi, 3\pi \Rightarrow E_P = 0$!! $\Rightarrow$ coerente $\Rightarrow$ interferência destrutiva

$$I \propto E_P^2 = 4E_0^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \operatorname{sen}^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

* Média da intensidade sobre o tempo (medidos)

$$I_{média} = I_0 \cos^2 \frac{\phi}{2} \qquad \overline{\operatorname{sen}^2\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)} = \frac{1}{2}$$

$$I_{média} = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d}{\lambda L} y\right)$$

TRANSPARÊNCIA 5

Adição das ondas pelos fasores

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= E_0 \operatorname{sen} \omega t \\ E_2 &= E_0 \operatorname{sen}(\omega t + \phi) \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} E_P &= E_1 + E_2 \\ E_r &\equiv \text{fasor resultante} \end{aligned}$$

No instante $t=0 \Rightarrow E_r = E_0 \cos\alpha + E_0 \cos\alpha = \underbrace{2E_0 \cos\alpha}$

pela geometria do Δ

$$E_R = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \qquad \alpha = \frac{\phi}{2}$$

Transparência 6

$$E_P = E_R \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right) = 2E_0 \cos\left(\frac{\phi}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

Método: – desenhar os fasores, com o final de um no início do outro

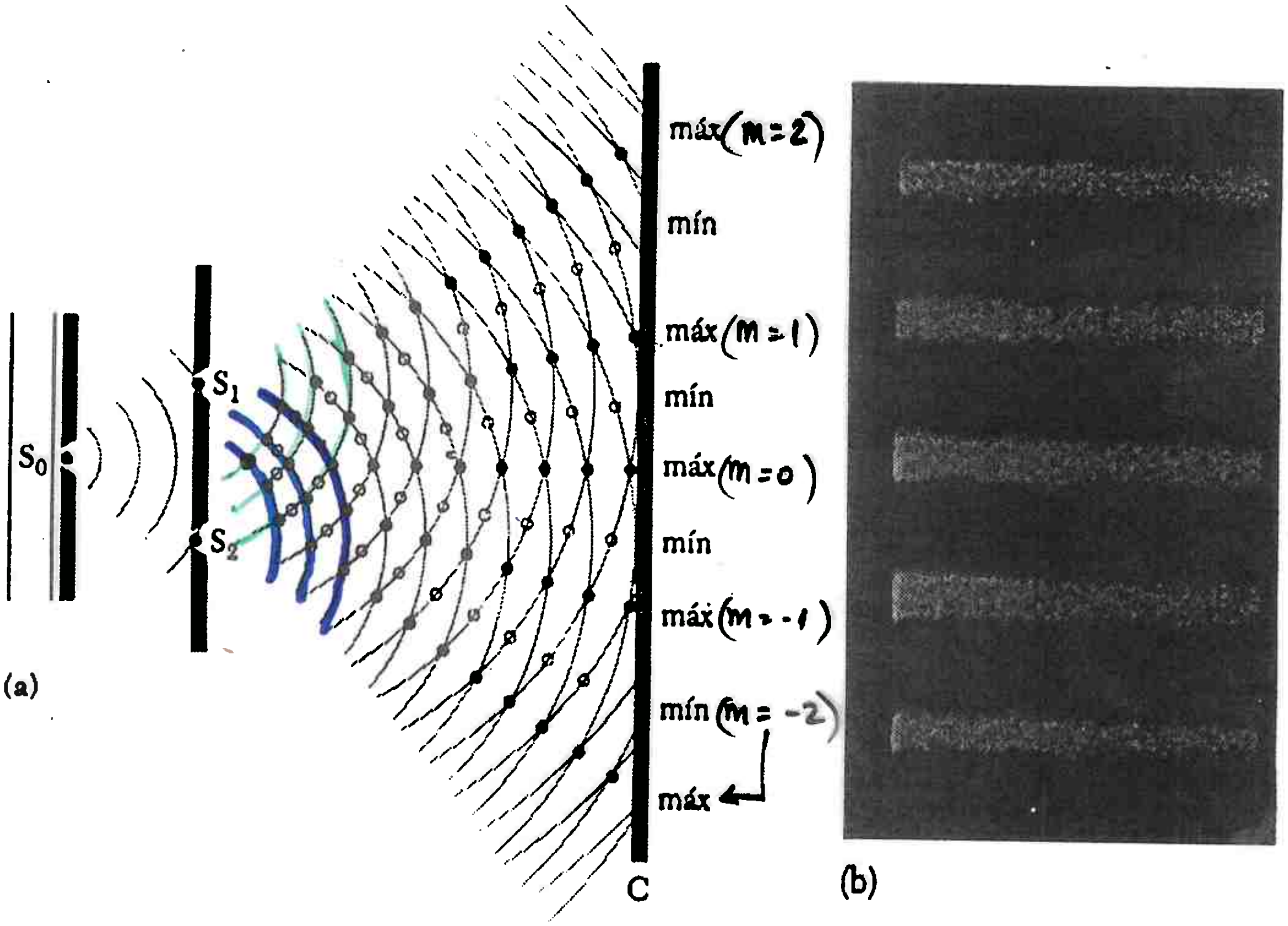
– onda resultante → fasor E_R

ângulo de fase da onda resultante

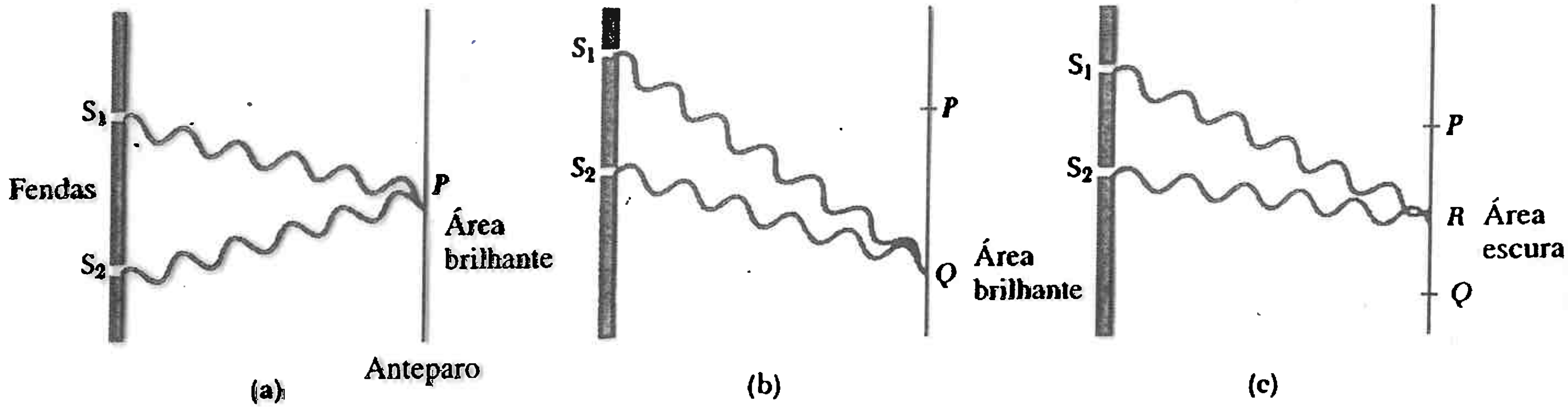
$$\boxed{E_P = E_R \operatorname{sen}(\omega t + \alpha)}$$

$$\left.\begin{aligned} 2\alpha + \beta &= 180 \\ \phi + \beta &= 180 \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} 2\alpha - \phi &= 0 \\ \alpha &= \frac{\phi}{2} \end{aligned}$$

T1

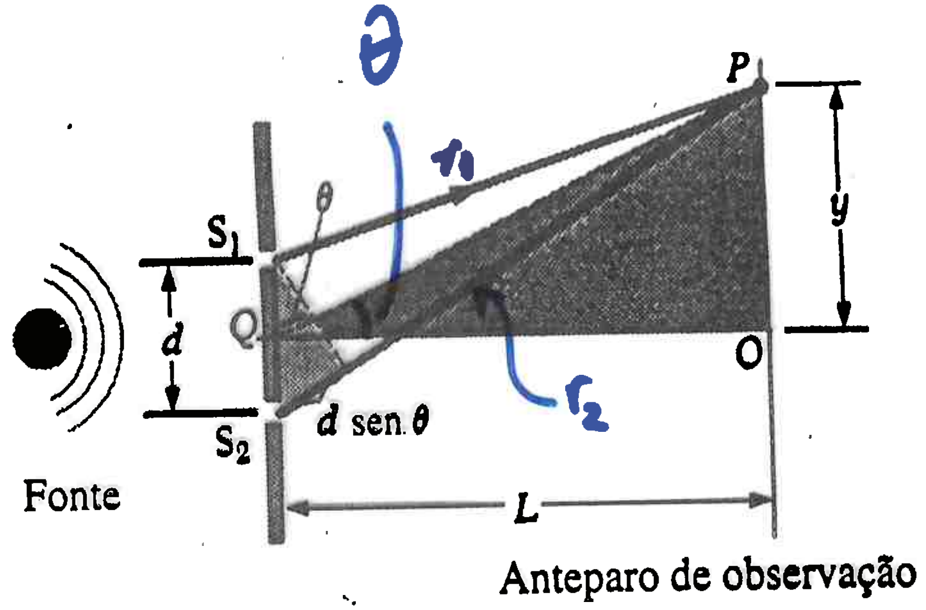


72

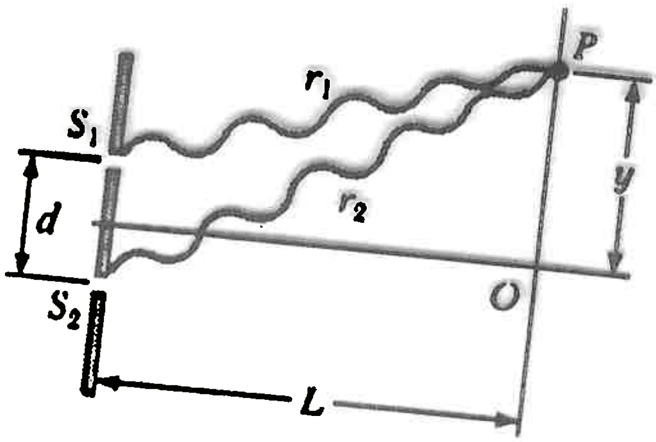


S1
Fendas
S2
P
Área
brilhante
Anteparo
(a)
S1
S2
P
Q
Área
brilhante
(b)
S1
S2
P
R
Área
escura
Q
(c)

T3

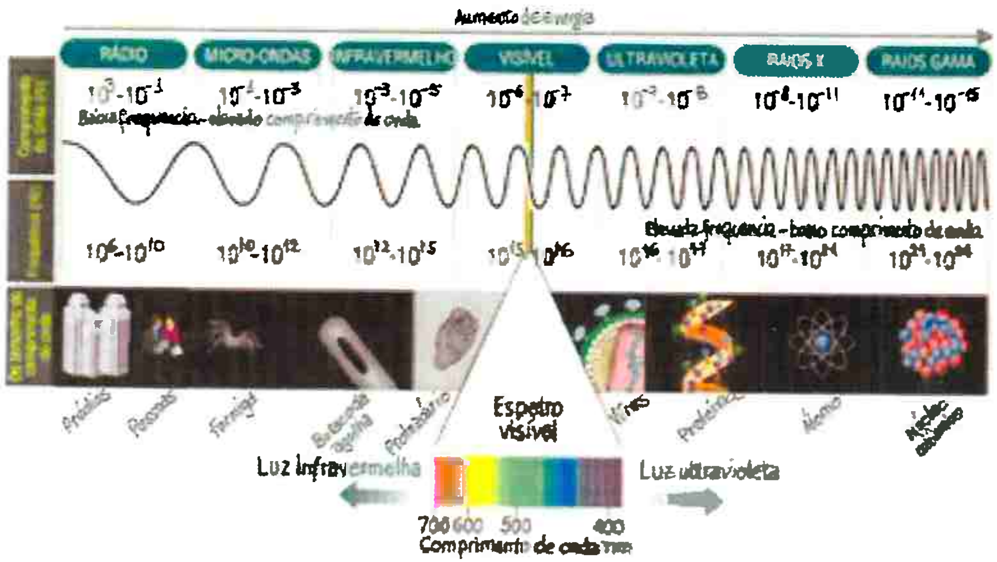


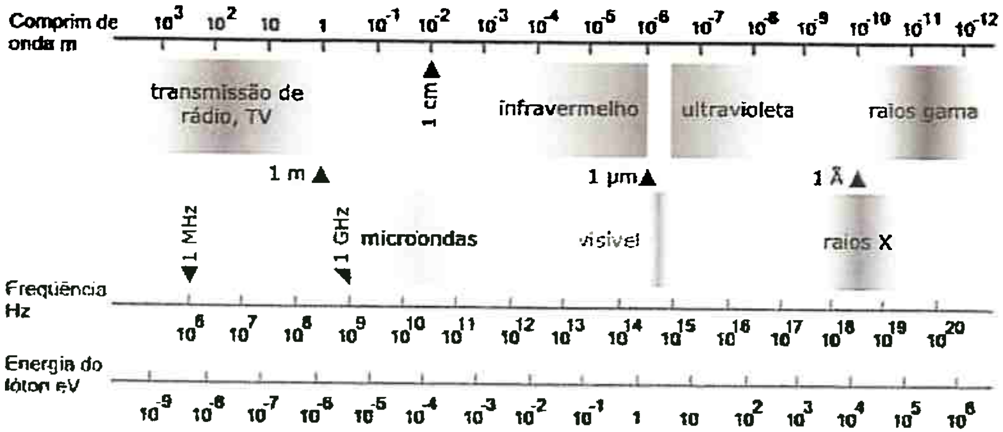
θ
r_1
P
θ
y
S_1
d
Q
O
r_2
d sen θ
S_2
L
Fonte
Anteparo de observação



P
r_1
S_1
y
d
r_2
O
S_2
L

T4A


Aumento de energia
RÁDIO
MICRO-ONDAS
INFRAVERMELHO
VISÍVEL
ULTRAVIOLETA
RAIOS X
RAIOS GAMA
Baixa frequência - elevado comprimento de onda
Elevada frequência - baixo comprimento de onda
Prédios
Pessoas
Formiga
Buraco da agulha
Protozoário
Vírus
Proteína
Átomo
Núcleo atômico
Espetro visível
Luz infravermelha
Luz ultravioleta
700 600 500 400
Comprimento de onda nm


Comprim de onda m
10^{3} 10^{2} 10 1 10^{-1} 10^{-2} 10^{-3} 10^{-4} 10^{-5} 10^{-6} 10^{-7} 10^{-8} 10^{-9} 10^{-10} 10^{-11} 10^{-12}
transmissão de rádio, TV
1 cm
infravermelho
ultravioleta
raios gama
1 m
1 µm
1 Å
1 MHz
1 GHz
microondas
visível
raios X
Frequência Hz
10^{6} 10^{7} 10^{8} 10^{9} 10^{10} 10^{11} 10^{12} 10^{13} 10^{14} 10^{15} 10^{16} 10^{17} 10^{18} 10^{19} 10^{20}
Energia do fóton eV
10^{-9} 10^{-8} 10^{-7} 10^{-6} 10^{-5} 10^{-4} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 1 10 10^{2} 10^{3} 10^{4} 10^{5} 10^{6}

T4

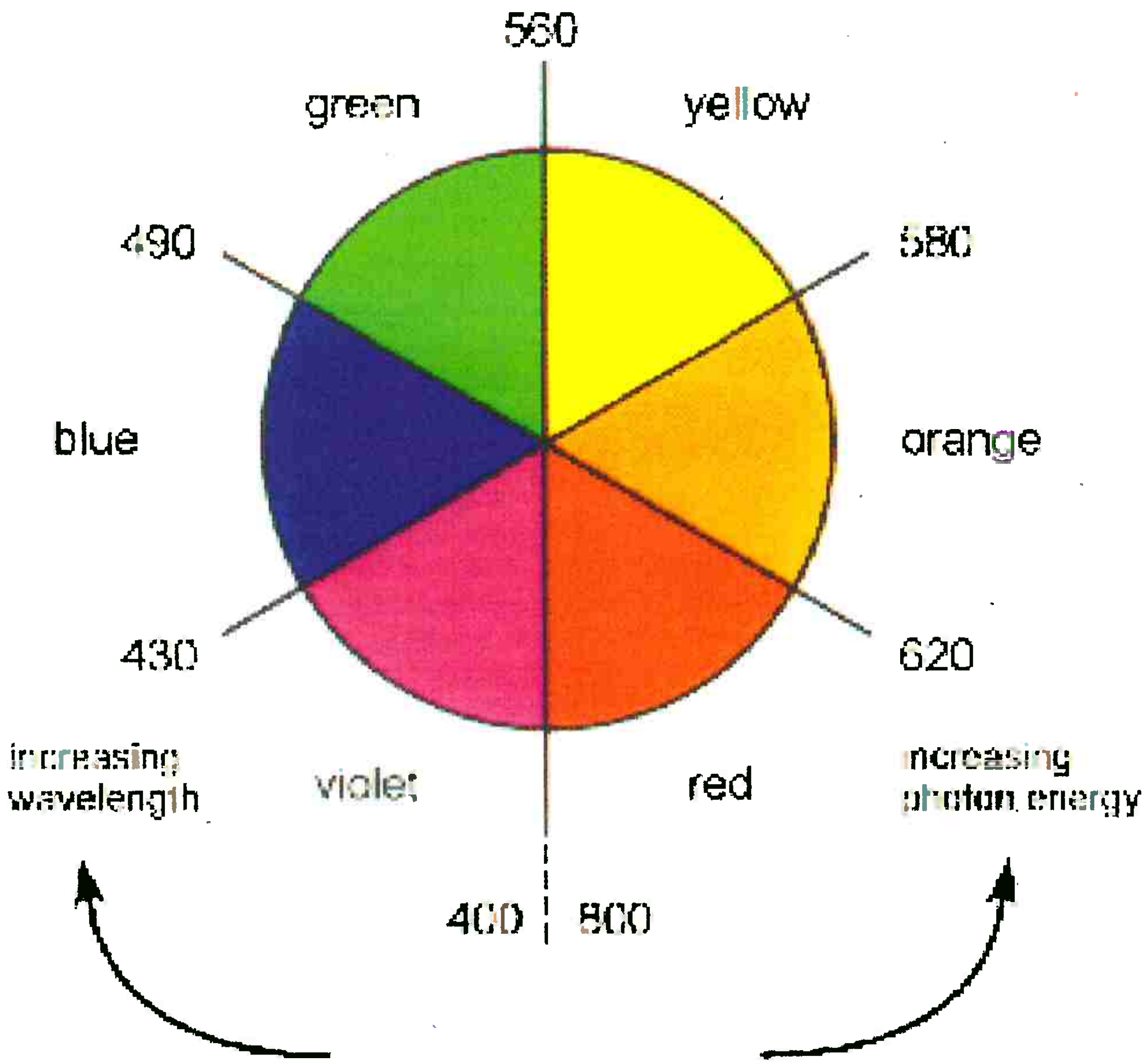
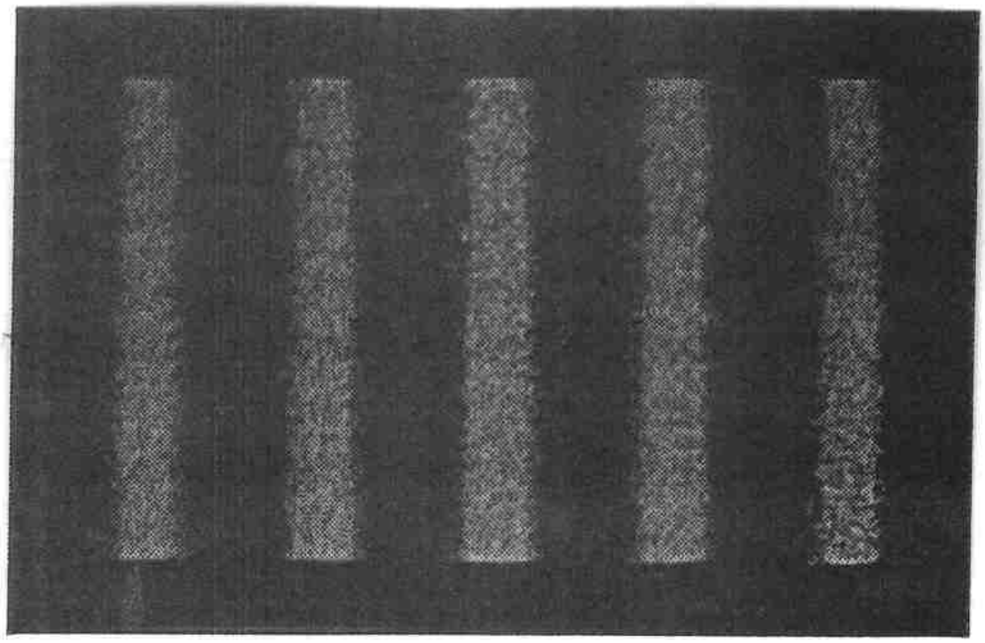
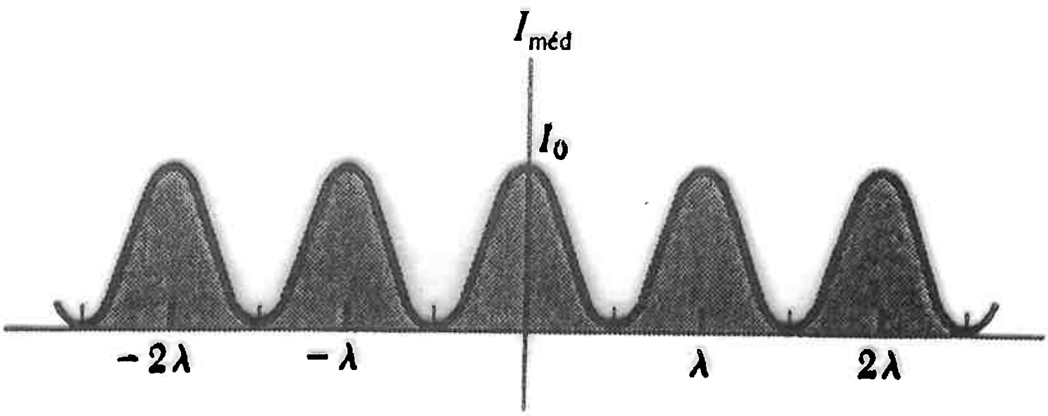


Fig. 1.1 *Artists' chart of approximate wavelength ranges (in nm) of reflected colours. Colours in directly opposite segments are called complementary: white light after absorption (removal) of a particular colour will show the complementary colour. (The reflected colour observed represents those wavelengths of the incident, polychromatic white light not absorbed by the pigment.) [41]*

(T5)



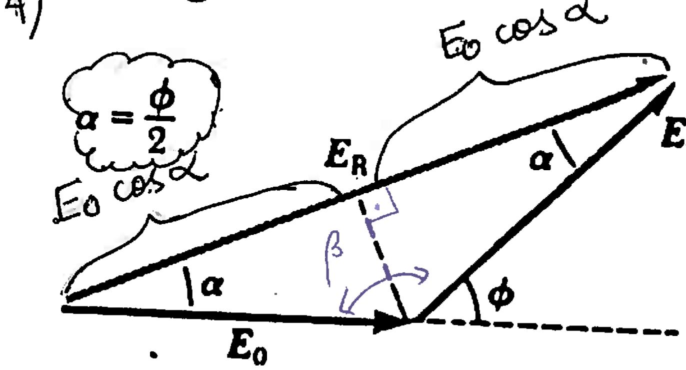


$2\alpha+\beta=180^\circ$

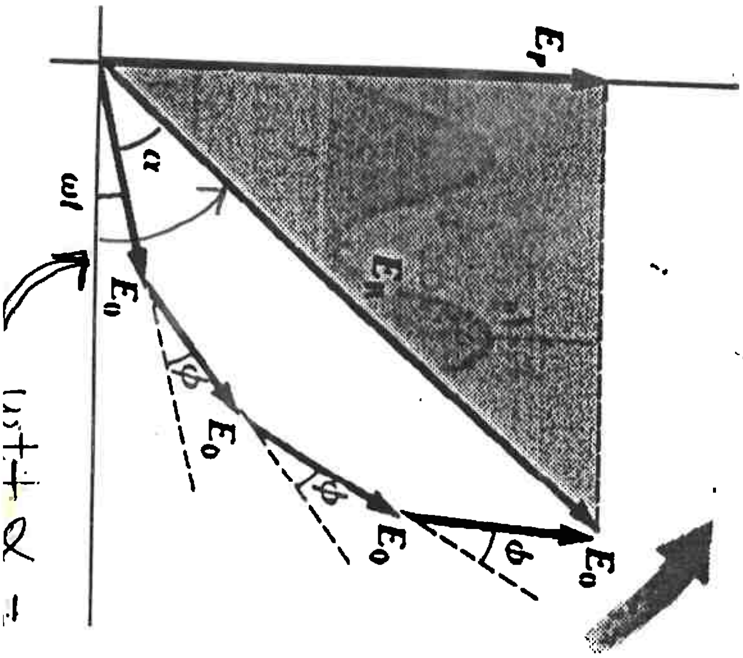
$\phi+\beta=180^\circ$

$2\alpha+\beta=\phi+\beta \Rightarrow \alpha=\frac{\phi}{2}$

4) $t=0$



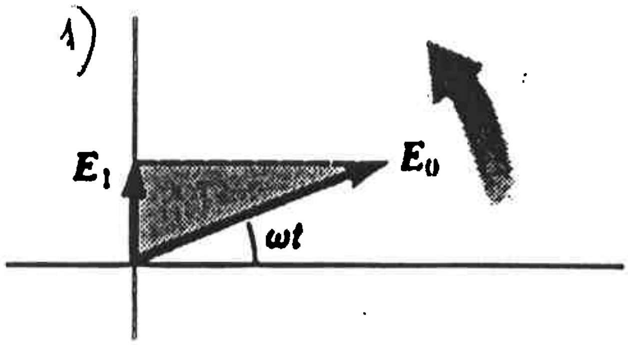
5) $E_P = E_R \, \mathrm{sen}(\omega t + \phi/2)$



$\omega t+\alpha = \omega t+\phi/2$

$E_1 = E_0 \, \mathrm{sen}\,\omega t$

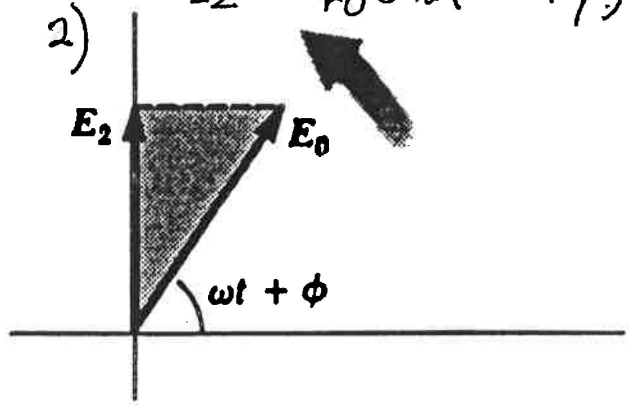
1)



(a)

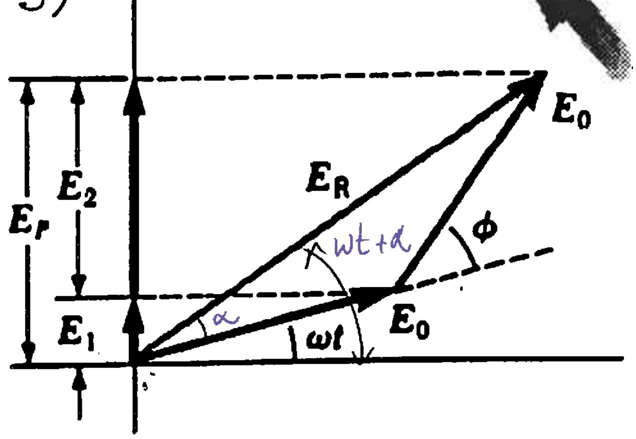
$E_2 = E_0 \, \mathrm{sen}(\omega t+\phi)$

2)



(b)

3) $E_P = E_1 + E_2$



(c)