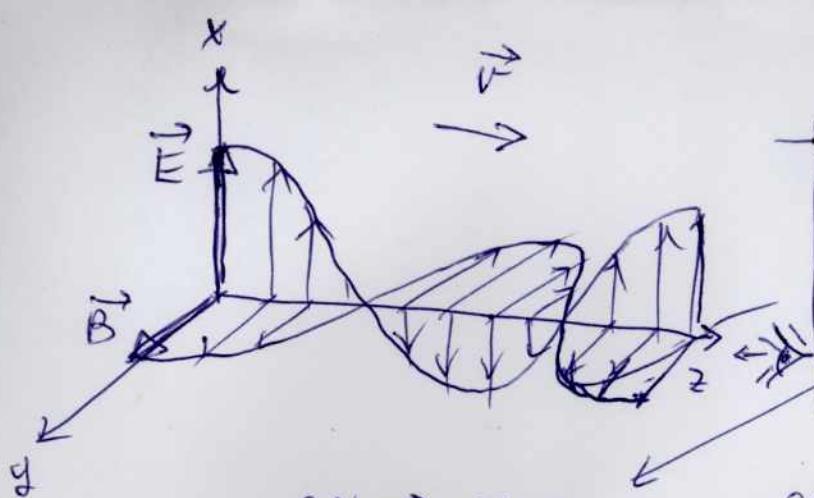


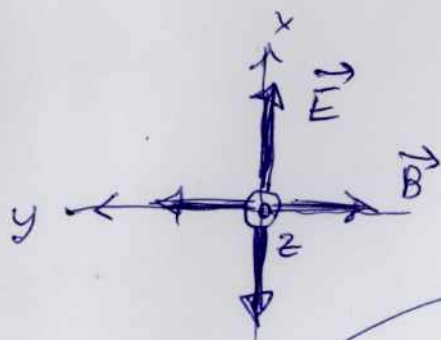


Plane wave

$$E_x(z, t) = E_0 \sin(kz - \omega t + \phi)$$

$$B_y(z, t) = B_0 \sin(kz - \omega t + \phi)$$

E_0, B_0 สันนิษฐาน
 ว่าเป็นค่าคงที่ของฟังก์ชันคลื่น/คลื่นไฟฟ้า



$\vec{E} \Rightarrow$ Polarized มโนภาพของ x

$$E = E(r, t) = E_0 \sin(kr - \omega t + \phi)$$

$r = r$ $t = t$

EM wave function ฟังก์ชันคลื่น/คลื่นไฟฟ้า

E_0 สันนิษฐาน $[N/C]$

k เลขคลื่น (Wave Number) $[rad/m]$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

λ ความยาวคลื่น (Wave length)

ω ความถี่เชิงมุม $[rad/s]$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

f ความถี่ (Frequency) $[Hz]$

$$T = \frac{1}{f}$$

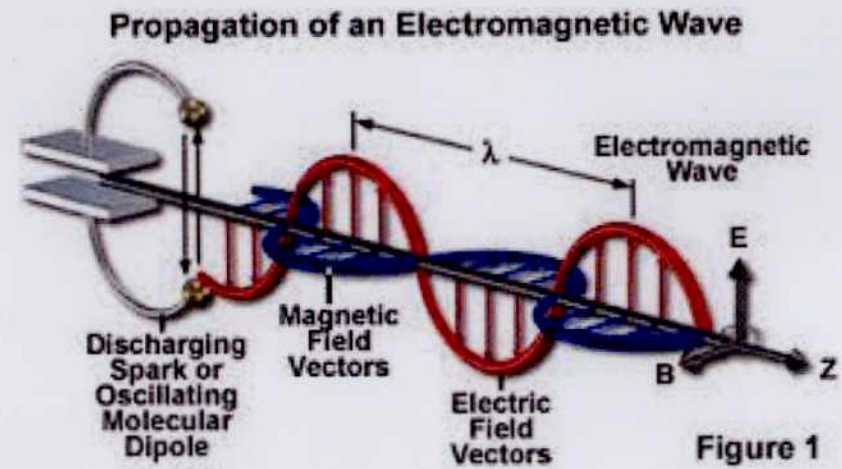
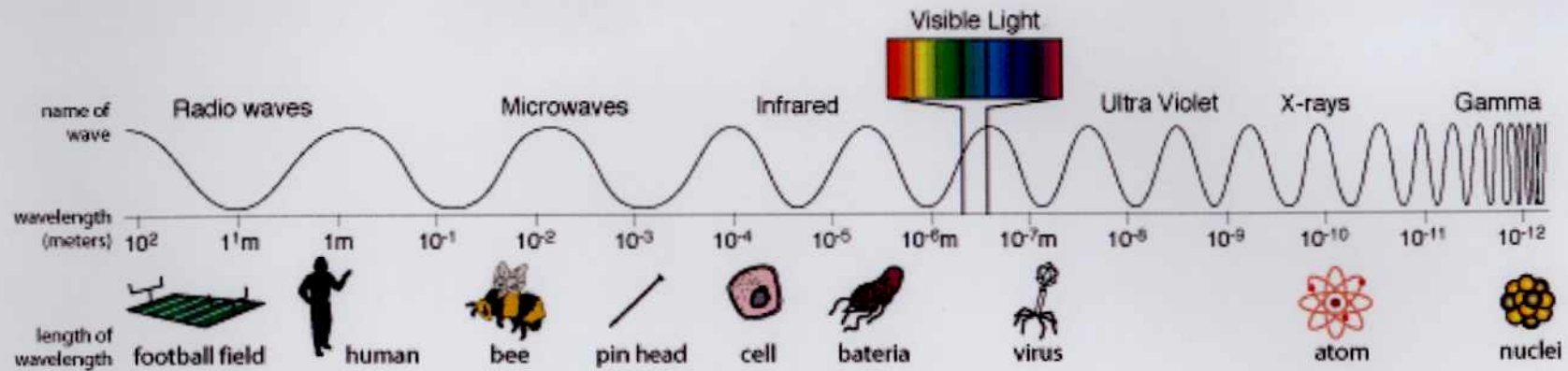
T (Period) $[s]$

$$v = \frac{\omega}{k} = \lambda f$$

"speed of wave" อัตราเร็วคลื่น $[m/s]$

$$I_0 \propto E_0^2$$

ความเข้ม
 "Intensity" $[W/m^2] \Rightarrow$ อัตราการ
 ส่งผ่านพลังงาน



สูตร

$$v = \lambda f = c$$

สมการนี้ใช้ได้กับทุกชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า $v = c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ *

$$\lambda = \frac{c}{f} : f = \frac{c}{\lambda}$$

อัตราเร็วแสง

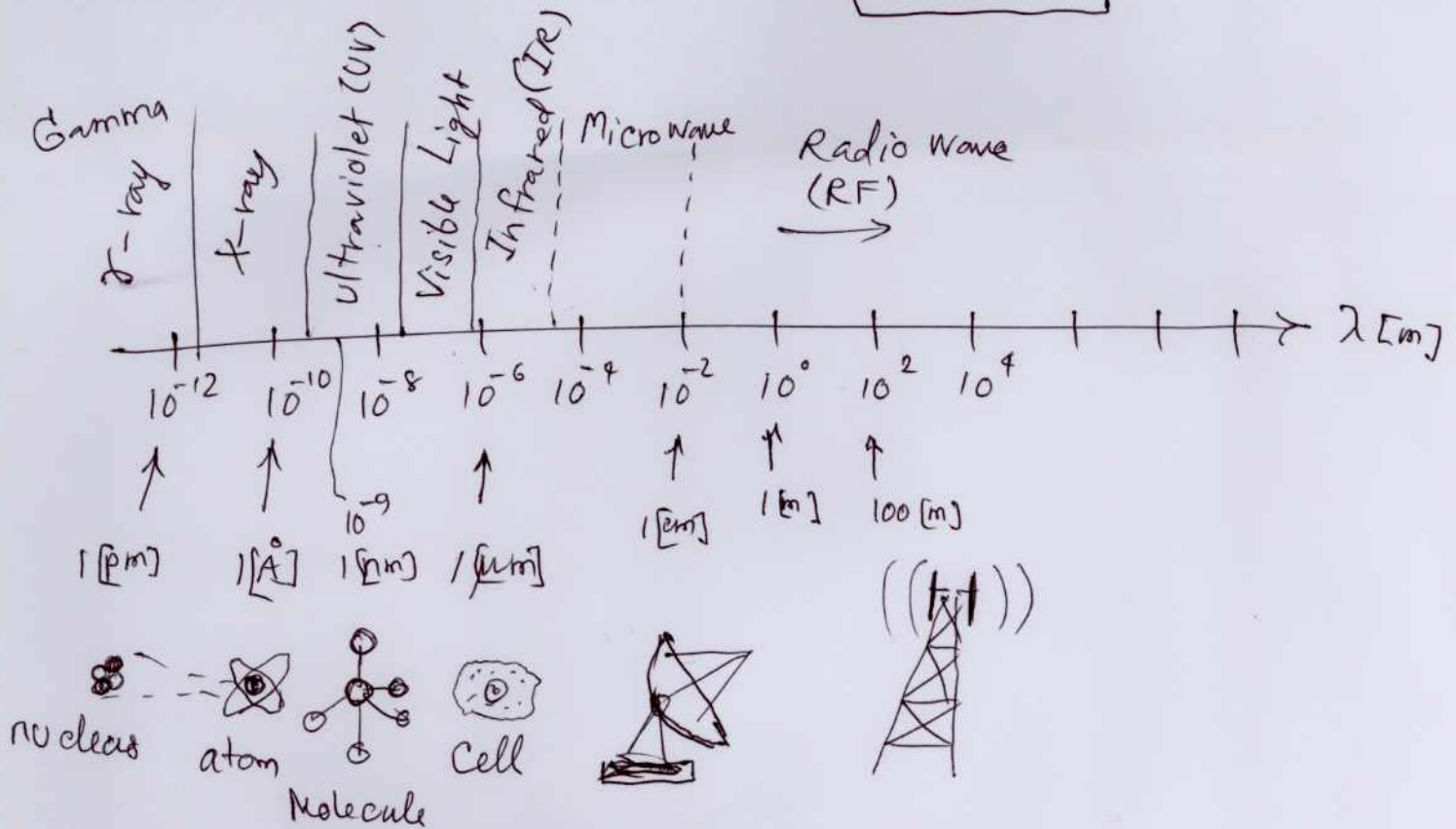
Ex

$$\lambda = 500 \text{ nm} \quad f = ?$$

$$\begin{aligned} f &= \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{500 \times 10^{-9}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ [m/s]}}{5 \times 10^{-7} \text{ [m]}} \\ &= \frac{3}{5} \times 10^{8+7} = 0.6 \times 10^{15} \text{ [Hz]} \\ &= \boxed{6 \times 10^{14} \text{ [Hz]}} \end{aligned}$$

EM. Wave Spectrum

$$c = \lambda f$$



สรุปได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีหลายชนิด EM

- แสง

- คลื่นวิทยุ

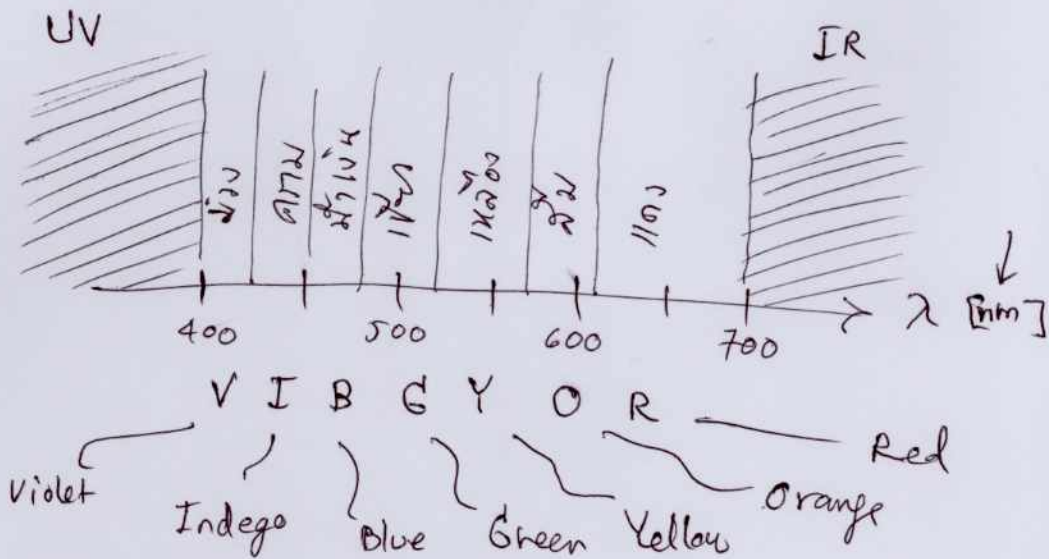
- ไมโครเวฟ

- วิทยุ

- โทรทัศน์

แสงที่มองเห็น (Visible Light)

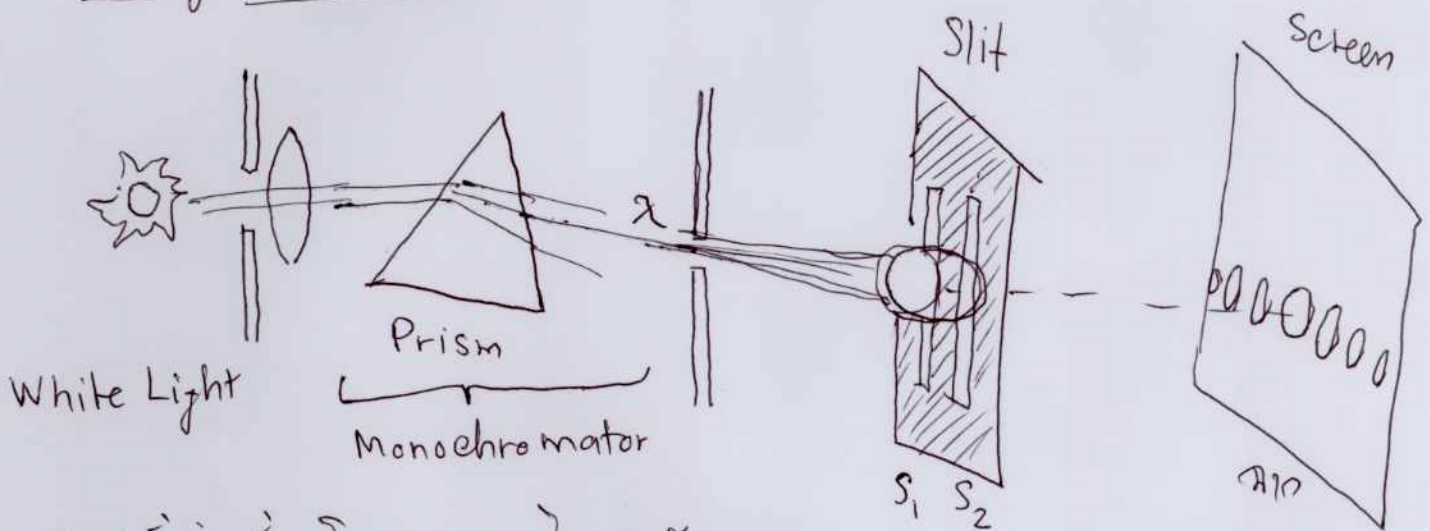
$$400 \text{ [nm]} < \lambda < 700 \text{ [nm]}$$



* แสงที่มองเห็น λ , f มองเห็น

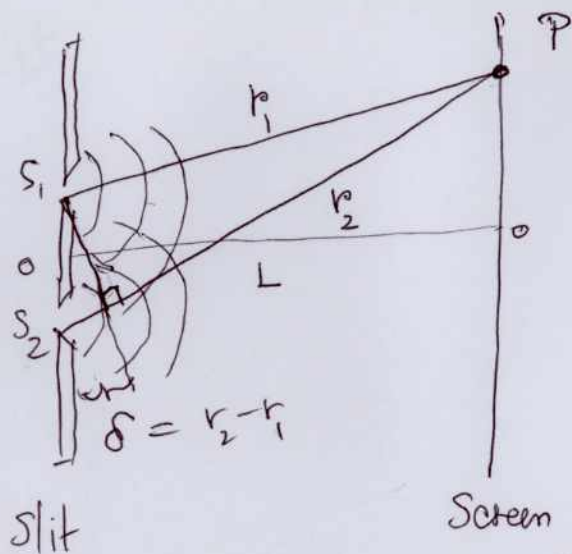
การแทรกสอดของแสง Light Interference

Young's Double Slit Experiment (1803)



แสงที่ผ่านช่องเปิด S_1, S_2 ไปพบกันบนฉาก
เกิดลวดลายเป็นจุดสว่างและจุดมืด $\Rightarrow$

ลวดลายการแทรกสอด
"Interference Pattern"



$$E_{1P} = E_0 \sin(\underbrace{kr_1 - \omega t}_{\theta_1})$$

$$E_{2P} = E_0 \sin(\underbrace{kr_2 - \omega t}_{\theta_2})$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

$$c = \lambda f = \frac{\omega}{k}$$

$$E_P = E_{1P} + E_{2P}$$

E_P ใหญ่

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$$

ความต่างเฟส

$$\boxed{\Delta\theta = 0} \Rightarrow \text{อินเทอร์เฟอเรนซ์}$$

$$\Delta\theta = (\underbrace{kr_2 - \omega t}_{\theta_2}) - (\underbrace{kr_1 - \omega t}_{\theta_1}) = k(r_2 - r_1)$$

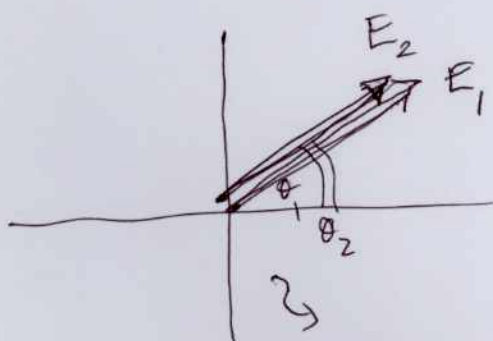
$$\boxed{\Delta\theta = k\delta}$$

$$\delta = r_2 - r_1$$

ความต่างวิถี

"Path Difference"

$\gamma = v = \frac{\omega}{k}$ ใกล้เคียงกันทำให้ θ_2, θ_1 ใกล้เคียงกัน



$$\Delta\theta = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$$

$$= 2m\pi ; m = 0, \pm 1, \pm 2$$

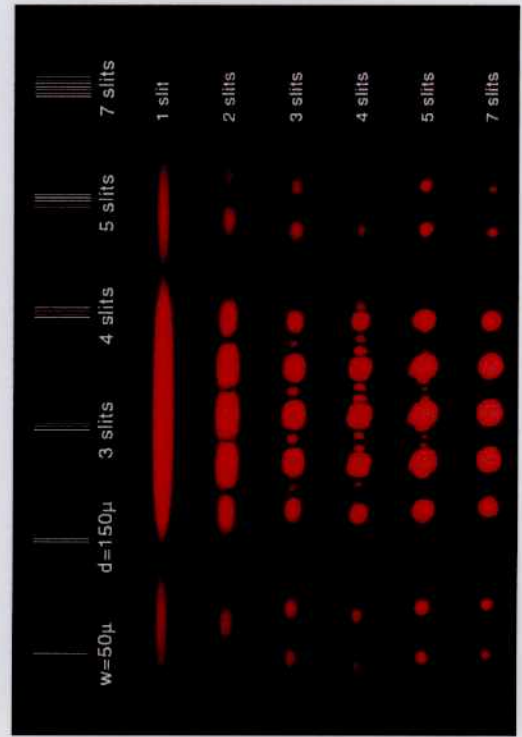
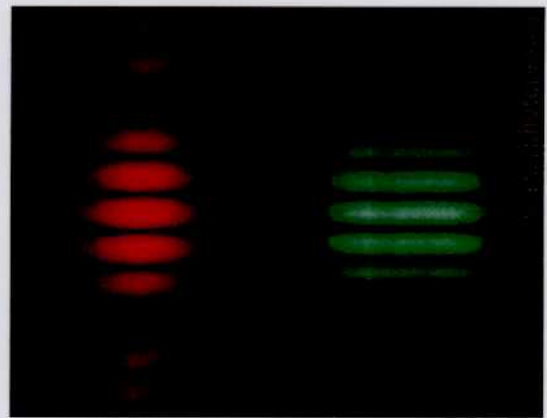
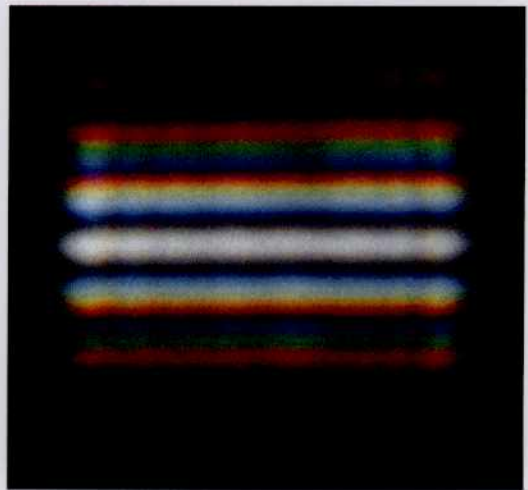
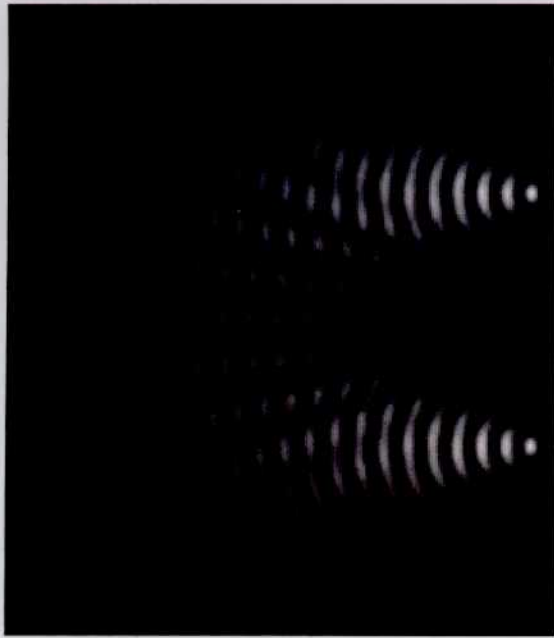
$$E_P = 2E_0 \text{ ได้ความเข้มมากที่สุด}$$

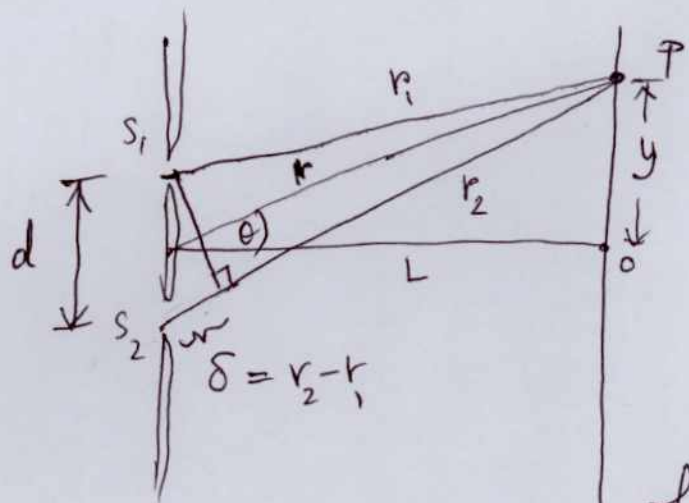
$\Rightarrow$ การรวมแบบเสริม
Constructive Interference

$$\Delta\theta = \boxed{k\delta = 2m\pi}$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

เลขอันดับ





သို့သော်လည်းကောင်း အကောင်အထည်ဖော်



$$k d \sin \theta = 2 m \pi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta = 2 m \pi$$

$$d \sin \theta = m \lambda$$

ဤကိစ္စသည်လျှပ်စစ်ဓာတ် "အကွင်း" ဖြစ်သည်။

$$\sin \theta \approx \frac{y}{r} \approx \frac{y}{L}$$

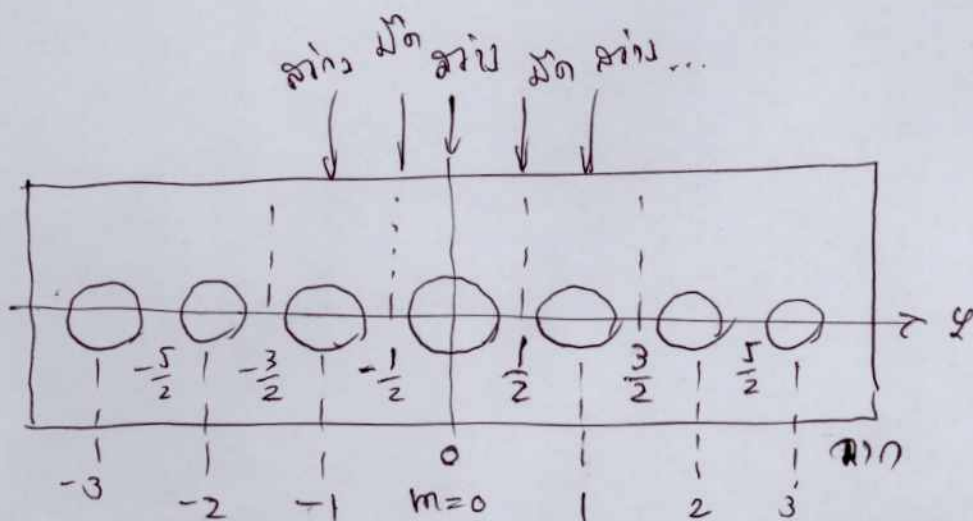
$$d \frac{y}{L} = m \lambda$$

$$y_m = m \frac{\lambda L}{d}$$

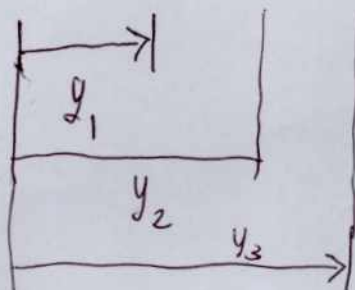
← တိုင်းတာမှုများအတွက် အကွင်းကို m

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$$

ဤကိစ္စသည်လျှပ်စစ်ဓာတ် "အနက်" ဖြစ်သည်။



L, d
 ကိစ္စသည်လျှပ်စစ်ဓာတ်
 အကွင်း λ ဖြစ်သည်။

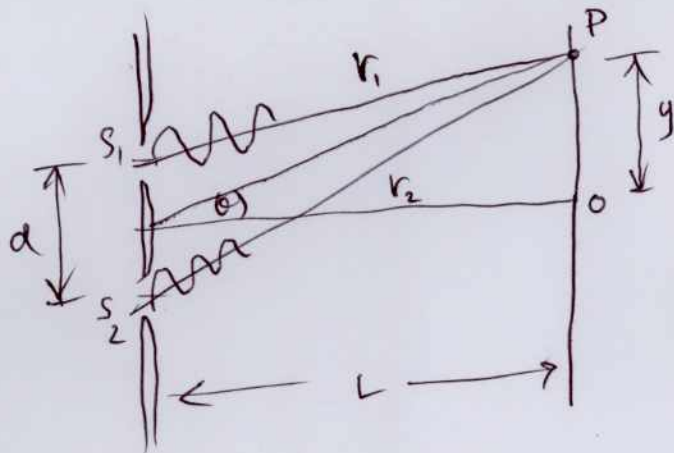


$$y_1 = \frac{\lambda L}{d}$$

$$y_2 = 2 \frac{\lambda L}{d}$$

$$y_3 = 3 \frac{\lambda L}{d}$$

Ex



$$d = 0.06 \text{ [mm]}$$

$$\lambda = 600 \text{ [nm]}$$

$$L = 4 \text{ [m]}$$

"ကျ"

$$d \sin \theta = m \lambda$$

"ဒဂ"

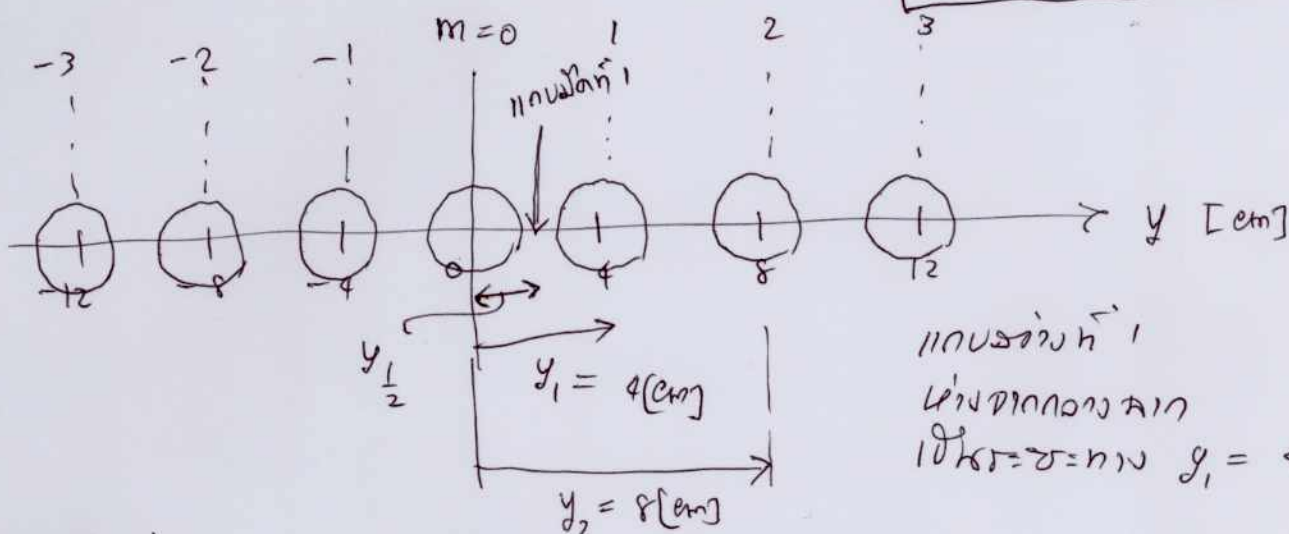
$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2}) \lambda$$

$$y_m = m \frac{\lambda L}{d}$$

ကျသောကိန်း
m=1

$$y_1 = \frac{\lambda L}{d} = \frac{(6 \times 10^{-7}) (4)}{(6 \times 10^{-5})} = 4 \times 10^{-2} = 4 \times 10^{-2} \text{ [m]}$$

$$y_1 = 4 \text{ [cm]}$$



ကျသောကိန်း

မရှိသောကိန်း

ပထမဆုံးကိန်း $y_1 = 4 \text{ [cm]}$

ကျသောကိန်း $(m + \frac{1}{2}) = \frac{1}{2}$

ပထမဆုံးကိန်း

$$y_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \frac{\lambda L}{d} = \frac{1}{2} y_1 = \frac{1}{2} (4 \text{ [cm]}) = 2 \text{ [cm]}$$

Ex

$$\lambda = 500 \text{ [nm]}$$
$$d = 0.1 \text{ [mm]}$$
$$L = 100 \text{ [cm]}$$

① រក y_3 ចំនួន $m=3$ គឺជាលំដាប់ទី 3
ឬ គឺជាលំដាប់ទី 3 គឺជាលំដាប់ទី 3

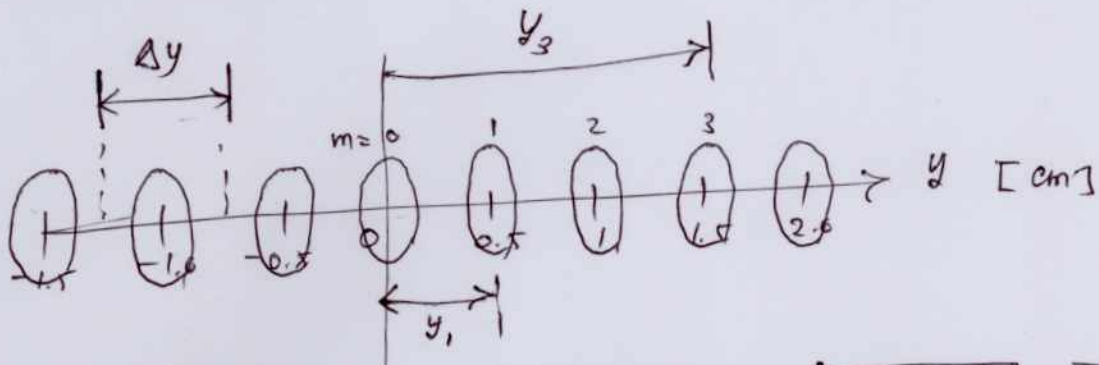
② រក y_1 ចំនួន $m=1$ គឺជាលំដាប់ទី 1
គឺជាលំដាប់ទី 1

ឬ $d \sin \theta = m \lambda$

$$d \frac{y}{L} = m \lambda$$

$$y_m = \frac{m \lambda L}{d}$$

$$y_1 = \frac{\lambda L}{d}$$
$$= \frac{(5 \times 10^{-7})(1)}{1 \times 10^{-4}} = 5 \times 10^{-3} \text{ (m)}$$
$$= 5 \text{ (mm)}$$



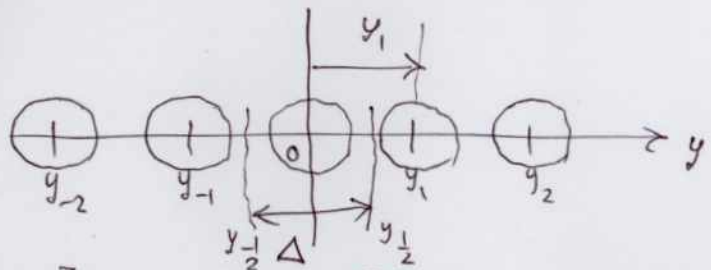
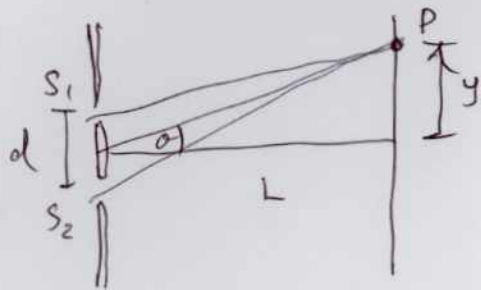
$$y_3 = 3 \frac{\lambda L}{d} = 3 y_1 = (3)(0.5) \text{ [cm]} = \boxed{1.5 \text{ [cm]}} = \boxed{15 \text{ [mm]}}$$

$$\Delta y = y_1 = \boxed{5 \text{ [mm]}}$$

Ex

$$\lambda = 500 \text{ [nm]} \quad d = 0.1 \text{ [mm]} \quad L = 3 \text{ [m]}$$

จงหาตำแหน่งของรอยมืดและของสว่างบนฉากที่อยู่ห่างจากช่องห่าง



$$y_1 = \frac{\lambda L}{d} = \frac{(5 \times 10^{-7})(3)}{(1 \times 10^{-4})} = 15 \times 10^{-7+4} = 15 \text{ [mm]} = \boxed{1.5 \text{ [cm]}}$$

$$\Delta = y_1 = \boxed{1.5 \text{ [cm]}}$$

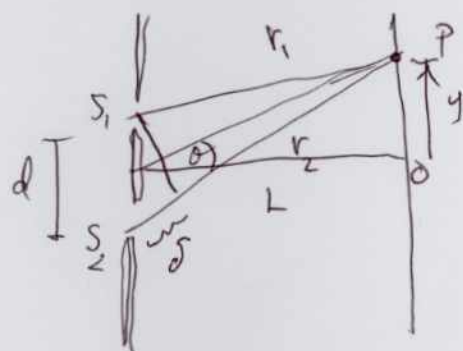
$$\text{หรือ } \Delta = |y_{\frac{1}{2}}| + |y_{-\frac{1}{2}}| = \left| \frac{1}{2} \frac{\lambda L}{d} \right| + \left| -\frac{1}{2} \frac{\lambda L}{d} \right| = \frac{\lambda L}{d} = y_1$$

→ สี่ตำแหน่งของรอยมืดและของสว่างบนฉากที่อยู่ห่างจากช่องห่าง



ตำแหน่งของรอยมืดและของสว่าง

$$I \propto E^2$$



$$E_p = E_1 + E_2$$

$$E_1 = E_0 \sin(\underbrace{k r_1 - \omega t}_{\theta_1})$$

$$E_2 = E_0 \sin(\underbrace{k r_2 - \omega t}_{\theta_2}) = E_0 \sin(\underbrace{k r_1 + k \delta - \omega t}_{\theta_2})$$

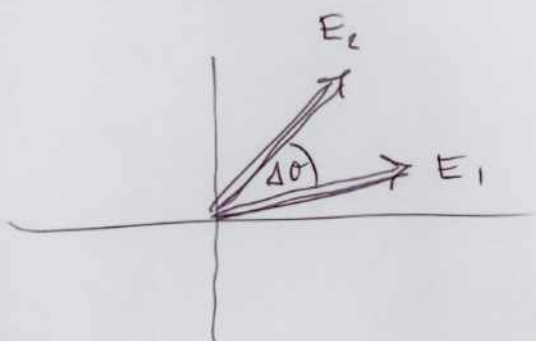
$$r_2 - r_1 = \delta$$

$$r_2 = r_1 + \delta$$

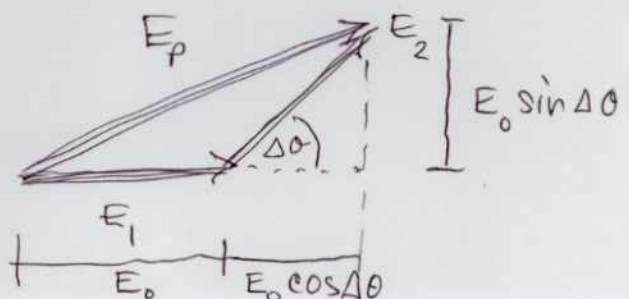
$$\theta_2 = \theta_1 + k \delta$$

$$\theta_2 - \theta_1 = \Delta \theta = \boxed{k \delta}$$

Phase Difference



⇒



$$E_p^2 = (E_0 + E_0 \cos \Delta\theta)^2 + E_0^2 \sin^2 \Delta\theta$$

$$= E_0^2 + 2E_0^2 \cos \Delta\theta + E_0^2 \underbrace{\cos^2 \Delta\theta + \sin^2 \Delta\theta}_{E_0^2}$$

$$= 2E_0^2 + 2E_0^2 \cos \Delta\theta = 2E_0^2 (1 + \cos \Delta\theta)$$

$$\cos^2 \frac{\theta}{2} = \frac{1 + \cos \theta}{2}$$

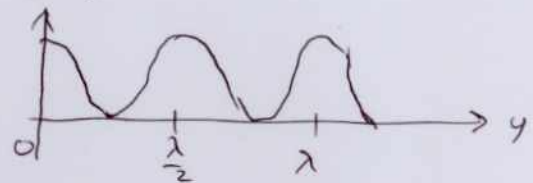
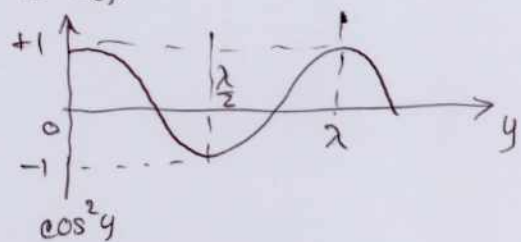
$$1 + \cos \theta = 2 \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

$$E_p^2(y) = 4E_0^2 \cos^2 \frac{\Delta\theta}{2}$$

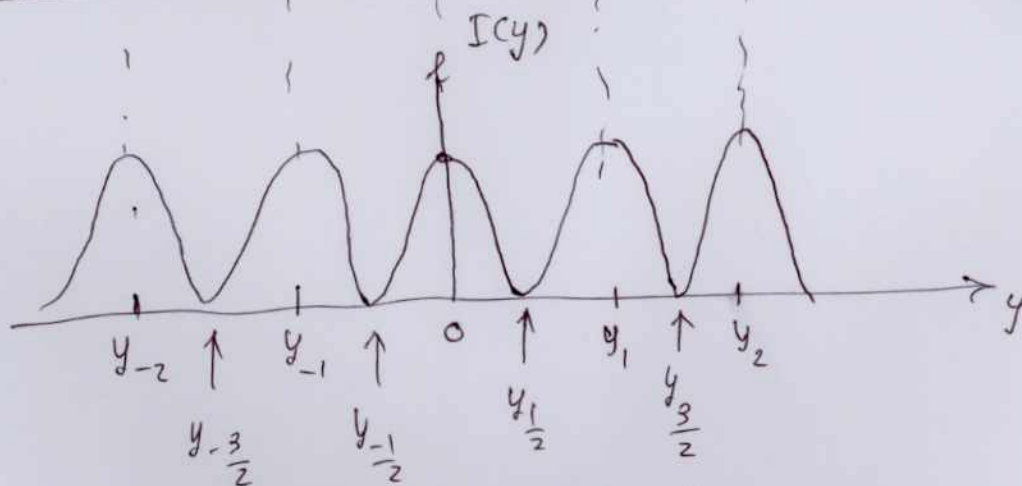
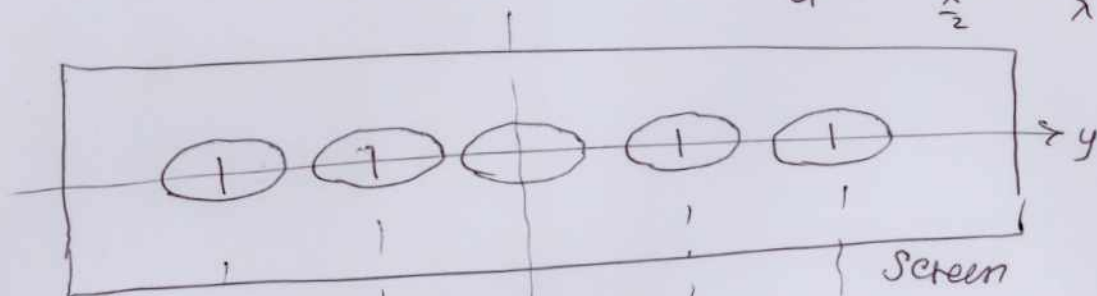
$$I_p(y) = I_{\max} \cos^2 \frac{\Delta\theta}{2}$$

$$\Delta\theta = k\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

$$\frac{\Delta\theta}{2} = \frac{\pi d y}{\lambda L}$$



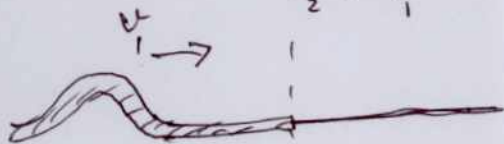
$$I_p(y) = I_{\max} \cos^2 \left(\frac{\pi d y}{\lambda L} \right)$$



⇒ ความหนาแน่นของพลังงานแสง

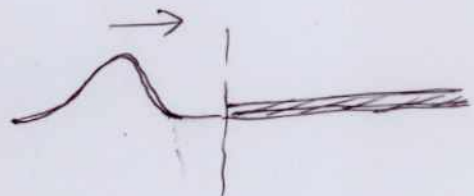
การเปลี่ยนเฟส ของคลื่นสะท้อน

μ_1 μ_2
 $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ $\mu_2 < \mu_1$
 $v_2 > v_1$



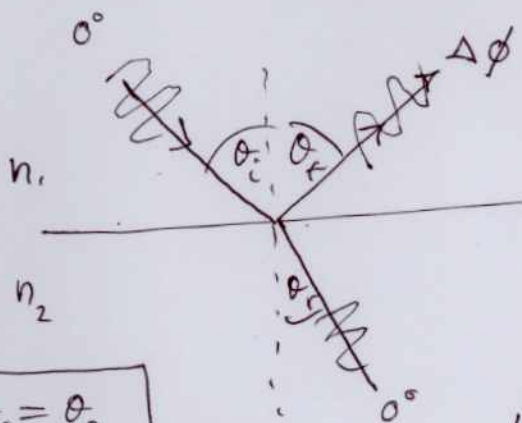
เมื่อคลื่นสะท้อนไม่เปลี่ยน ถ้า $\mu_2 \leq \mu_1$

μ_1 μ_2
 $\mu_2 > \mu_1$



เมื่อคลื่นสะท้อนเปลี่ยน $180^\circ = \pi$ ถ้า $\mu_2 > \mu_1$

การสะท้อน (Reflection)



ดัชนีหักเห (Index of Refraction)

$$n = \frac{c}{v}$$

ในสุญญากาศ $v < c$

$$n \geq 1$$

อากาศ

$$n \approx 1$$

น้ำ

$$n \approx 1.33$$

$$\theta_i = \theta_r$$

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$$

* ในกรณีการสะท้อน
 ๑: เปลี่ยน 180° เมื่อ $n_2 > n_1$

$$\Delta \phi = \begin{cases} 0 & : n_2 \leq n_1 \\ \pi & : n_2 > n_1 \end{cases}$$

$$c = \lambda f$$

$$v = \frac{c}{n} = \frac{\lambda f}{n}$$

$$\Rightarrow v = \lambda_n f$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$$

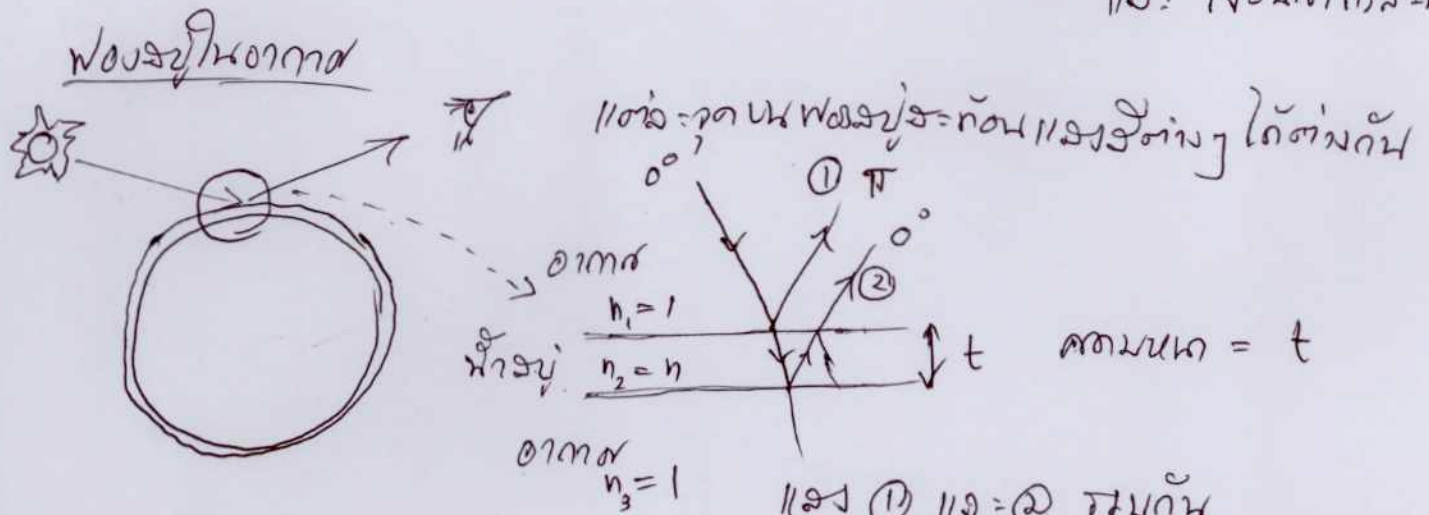
$$k_n = \frac{2\pi}{\lambda_n}$$

สำหรับค่าของ
 ความยาวคลื่น
 ในตัวกลาง n

$$E = E_0 (kr - \omega t + \phi)$$

เวลา
เฟสของคลื่นแปรเปลี่ยนตาม $r = v = \text{ทม}$

หรือ: เงื่อนไขการสะท้อน



เงื่อนไขการแทรกสอดที่ต่างกันของแสง

$$\Delta\phi = \underbrace{k \delta}_{\substack{n \\ r=v=\text{ทม}}} \underbrace{\pi}_{r=\text{หักเห}} = \underbrace{\left(\frac{2\pi}{\lambda} n\right)}_{\frac{1}{\lambda} n} \underbrace{(2t)}_{\delta} - \pi$$

$\phi_2 - \phi_1$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi n t}{\lambda} - \pi = \begin{cases} 2m\pi & \text{"สว่าง" ส=หักเห} \\ (2m+1)\pi & \text{"มืด" ส=หักเหไม่หักเห} \end{cases}$$

ส=หักเห

$$\frac{4\pi n t}{\lambda} - \pi = 2m\pi$$

$$\frac{4\pi n t}{\lambda} = (2m+1)\pi$$

$$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

ความหนา t ส=หักเหแสง λ
ได้ส ถ้า ความหนาเป็นครึ่ง

$$m = 0, 1, 2, \dots$$

ส=หักเหไม่หักเห

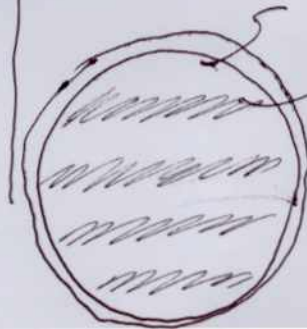
$$\frac{4\pi n t}{\lambda} - \pi = (2m+1)\pi$$

$$2nt = (m+1)\lambda$$

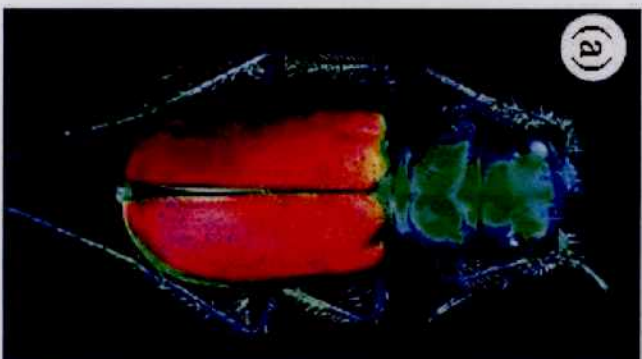
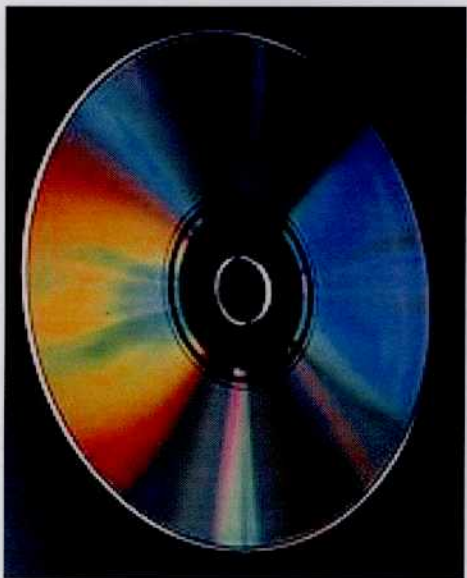
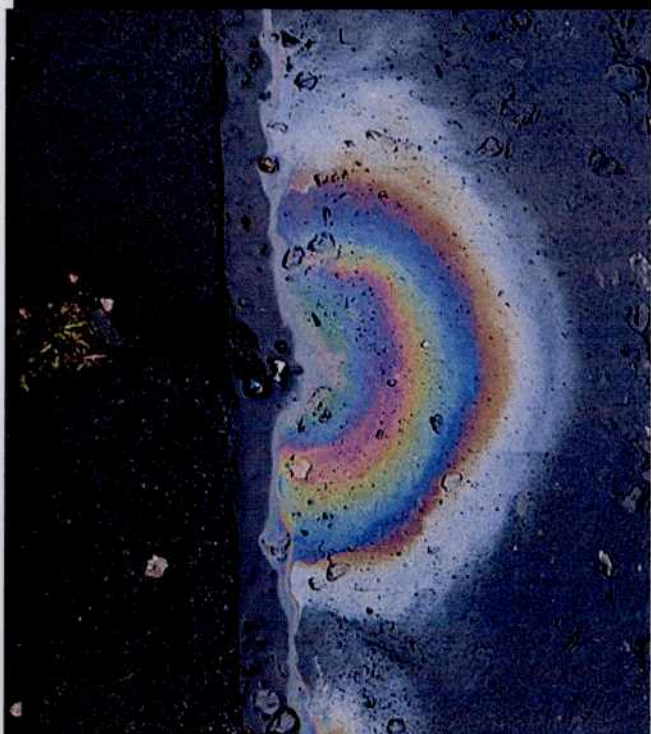
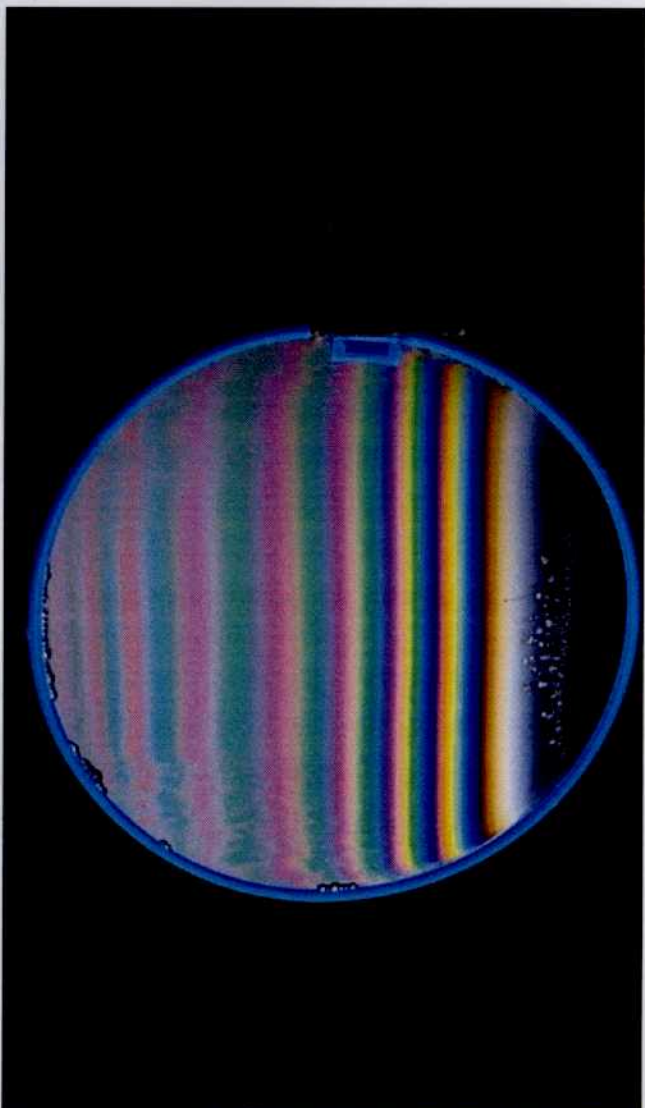
$$2nt = m\lambda$$

$$m = 1, 2, \dots$$

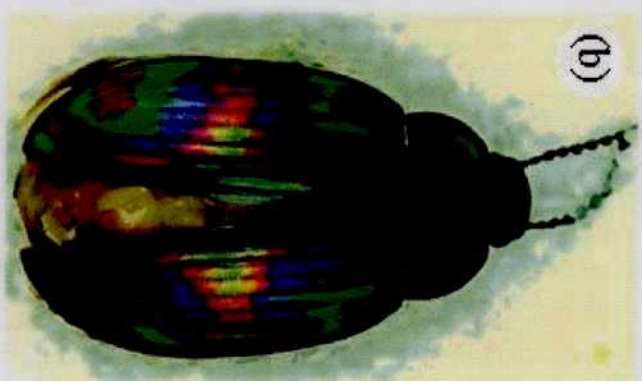
สว่าง ส=หักเห
มืด ส=หักเหไม่หักเห



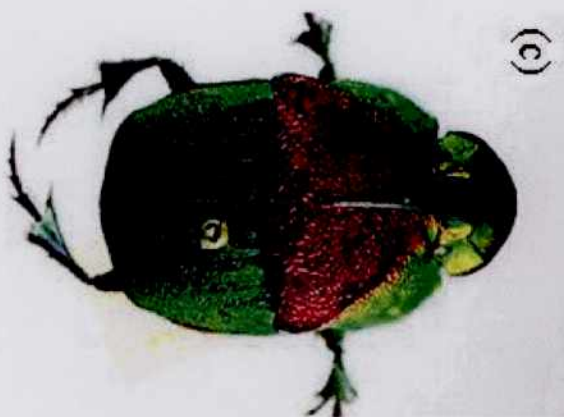
t หรือ n
กำหนดสีของฟอตอน



(a)



(b)



(c)

Ex

1/8 นิ้ว สีน้ำเงิน $\lambda = 600 \text{ [nm]}$

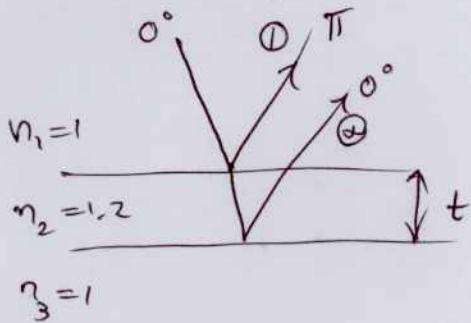
ในฟิล์มบาง $n = 1.2$ จะมีความหนาแน่นเท่าไร?

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} = \frac{600}{1.2} \text{ [nm]} = \boxed{500 \text{ [nm]}}$$

Ex

ฟิล์มบางใสในอากาศ, ฟิล์มบางมีสีน้ำเงินสะท้อนน้ำเงิน $\lambda_0 = 480 \text{ [nm]}$

ถ้า $n_2 = 1.2$ ในบริเวณนี้ จะมีความหนาแน่นเท่าไร?



สำหรับฟิล์มบาง λ_0

$$2nt = (m + \frac{1}{2}) \lambda$$

หรือ
 $m = 0$

$$2nt = \frac{\lambda}{2}$$

$$\boxed{t = \frac{\lambda}{4n}} = \frac{480}{4(1.2)} \text{ [nm]} = \boxed{100 \text{ [nm]}}$$

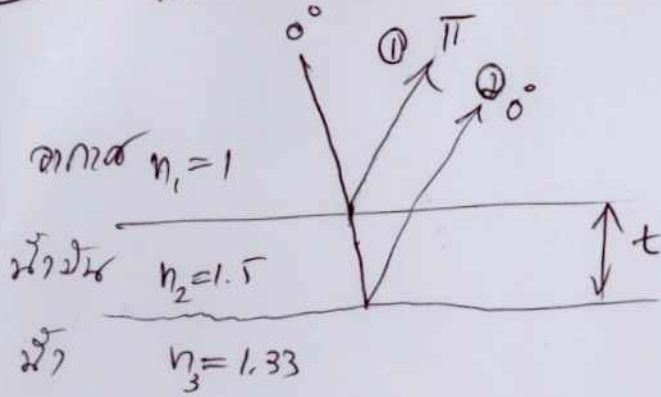
* สีน้ำเงิน ฟิล์มบาง จะมีความหนาแน่น

Ex

หาค่าของ t ให้แสงสีน้ำเงินเป็นสีเสริม

$$n_2 = 1.5 \quad \text{สีน้ำเงิน}$$

$$n_3 = 1.33 \quad \text{น้ำ}$$



แสงสีน้ำเงินเป็นสีเสริม

$$\lambda = 500 \text{ nm}$$

$$t = ?$$

$$\Rightarrow \text{สีเสริม}$$

$$2n_2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

$$\Rightarrow \text{บางจุด } m=0$$

$$2n_2t = \frac{\lambda}{2}$$

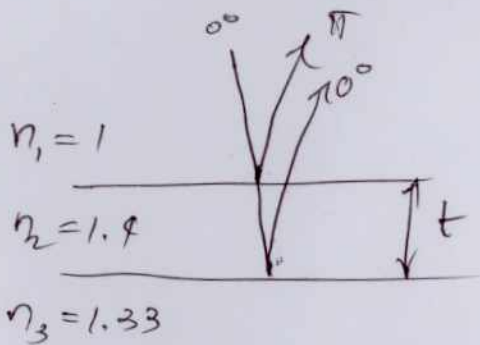
$$t = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{500}{4(1.5)} = \boxed{83 \text{ [nm]}}$$

Ex

หาค่าของ t ให้แสงสีน้ำเงิน $t = 300 \text{ [nm]}$ แสงสีน้ำเงิน

$$n_2 = 1.4 \quad n_3 = 1.33$$

$\Rightarrow$ แสงสีน้ำเงินเป็นสีเสริม?



สีน้ำเงิน

$$2n_2t = m\lambda$$

$$m = 1, 2, \dots$$

$$\lambda = \frac{2n_2t}{m}$$

$$= \frac{(2)(1.4)(300)}{m} \text{ [nm]}$$

$$\lambda = \frac{840}{m} \text{ [nm]}$$

$$m_1 = 1$$

$$\lambda_1 = 840 \text{ [nm]} \quad (\text{IR})$$

$$m = 2$$

$$\lambda_2 = 420 \text{ [nm]} \quad \leftarrow$$

$$m = 3$$

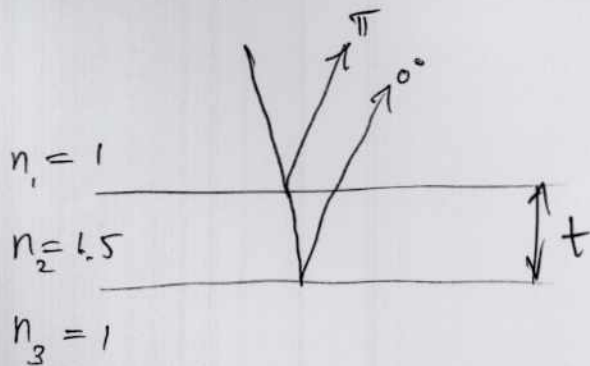
$$\lambda_3 = 280 \text{ [nm]} \quad (\text{UV})$$

Ex

ฟิล์มบางในอากาศ $n = 1.5$

แสงสีเหลือง $\lambda = 660 \text{ (nm)}$ สะท้อนได้ดี

$t = ?$



สะท้อน

$$2n_2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

$$t = \frac{(m + \frac{1}{2})\lambda}{2n_2}$$

บางสุด $m=0 \Rightarrow$

$$t = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{660 \text{ (nm)}}{4(1.5)} = \boxed{110 \text{ (nm)}}$$

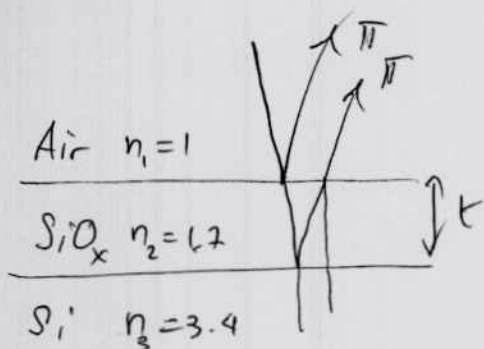
Ex

Film SiO_2 บนแผ่นซิลิคอน

$\lambda = 680 \text{ (nm)}$

แสงสีน้ำเงิน/ฟ้า สะท้อนได้ดี

$t = ?$



หักเห

$$2n_2t = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

$$t = \frac{(m + \frac{1}{2})\lambda}{2n_2}$$

บางสุด

$$t = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{680 \text{ (nm)}}{4(1.7)} = \boxed{100 \text{ (nm)}}$$