

บรรยาย 12 แสงที่ตามองเห็น และทัศนศาสตร์

Physics 122, รร.ช่างทันตกรรม, ปีการศึกษา 2564-65/1

อุดม รอบคอบ

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ม.มหิดล

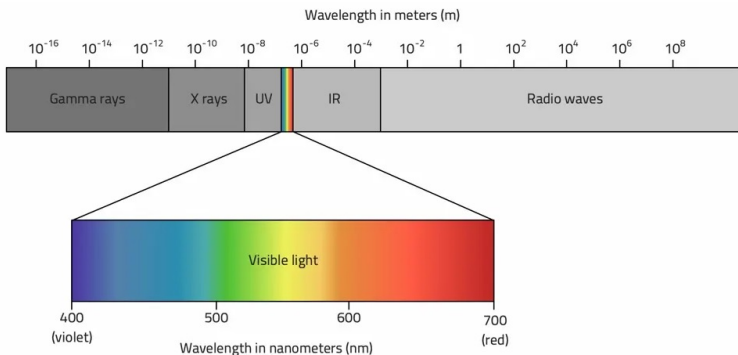
28 มกราคม 2565

หัวข้อ

1. แสงที่ตามองเห็น และการโพลาไรซ์ของแสง
2. ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต
3. การเกิดภาพจากแสงสะท้อน และแสงหักเห
4. เลนส์บาง และอุปกรณ์ทัศนศาสตร์
5. คลื่นแสง และหลักการของฮอยเกนส์
6. การแทรกสอด
7. การเลี้ยวเบน

แสงที่ตามองเห็น และการโพลาไรซ์ของแสง

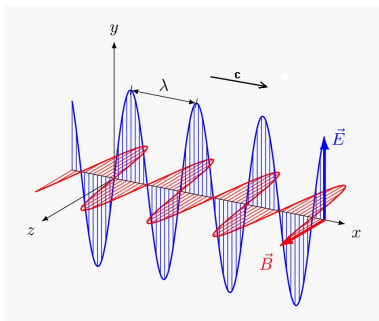
- ▶ แสงที่ตามองเห็น เป็นส่วนหนึ่งของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงความยาวคลื่น $400\text{nm} - 700\text{nm}$



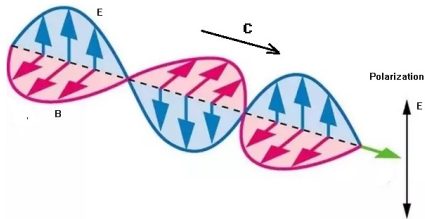
- ▶ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ คลื่นการเหนี่ยวนำระหว่างสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก เดินทางด้วยความเร็ว

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

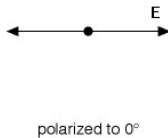
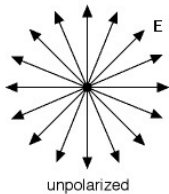
- ▶ ขนาดของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก ในคลื่นมีค่าดังนี้ $|E| = c|B|$ ดังนั้น เราจึงถือเอาสนามไฟฟ้าในคลื่น เป็นตัวแสดงเอกลักษณ์ของคลื่น



- ▶ การโพลาไรซ์ของแสง = ทิศของสนามไฟฟ้าในคลื่นแสง

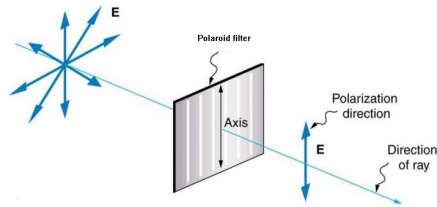
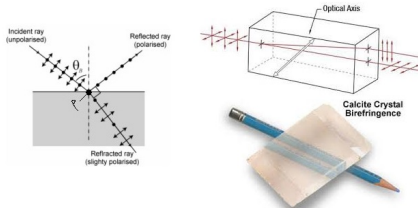


- ▶ แสงไม่โพลาไรซ์ = แสงที่มีการโพลาไรซ์ ในทุกทิศทาง



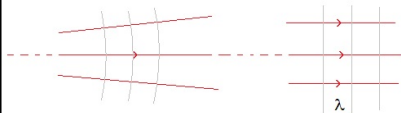
▶ แสงโพลาไรซ์เกิดจาก

- ▶ การสะท้อนที่มุมบรีวส์เตอร์
- ▶ ผ่านผลึกโปร่งแสงชนิด birefringent
- ▶ ผ่านแผ่นโพลาไรซ์



ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต

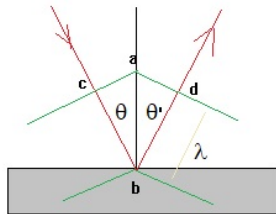
▶ แฉวลำแสง



▶ หลักการสะท้อนแสง

$$\Delta abc = \Delta abd \mapsto \theta = \theta'$$

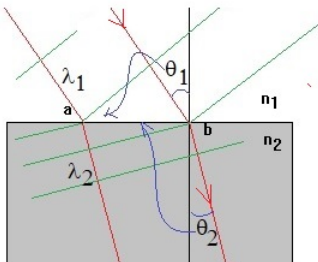
มุมสะท้อน = มุมตกกระทบ



- ▶ ดรรชนีหักเหแสง $n = c_0/c$, $\lambda_n = \lambda_0/m$

Material	Index of Refraction (n)
Vacuum	1.000
Air	1.000277
Water	1.333333
Ice	1.31
Glass	About 1.5
Diamond	2.417

- ▶ หลักการหักเหแสง

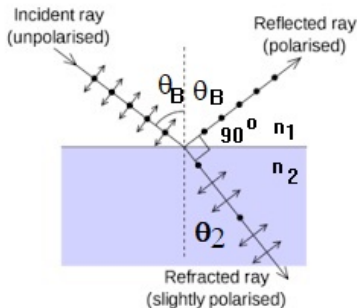


$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda_1}{ab}, \quad \sin \theta_2 = \frac{\lambda_2}{ab}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Snell's law

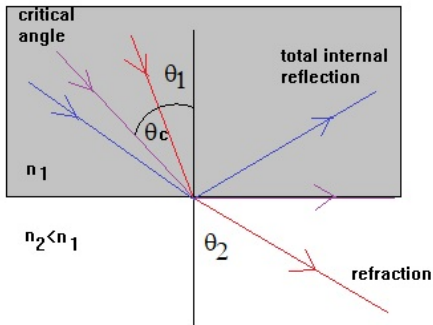
► มุมบริวิสต์เตอร์



$$\theta_2 = 90^\circ - \theta_B \mapsto \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_B}{\sin(90^\circ - \theta_B)} = \frac{\sin \theta_B}{\cos \theta_B} = \tan \theta_B$$
$$\mapsto \theta_B = \tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

แสงสะท้อนจากผิวกระจกในอากาศ $\theta_B = \tan^{-1} 1.5 = 56.3^\circ$

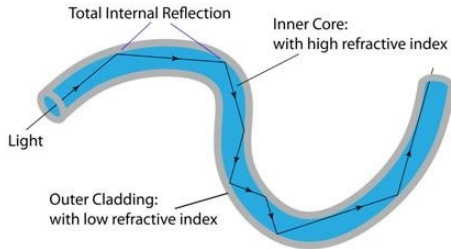
► มุมวิกฤติ ก้กับการสะท้อนกลับหมด



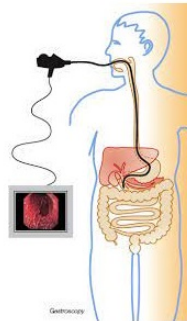
$$\frac{\sin \theta_c}{\sin 90^\circ} = \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \mapsto \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1}$$

$$\text{Glass/Air interface} : \mapsto \theta_c = \sin^{-1} \frac{1}{1.5} = 41.8^\circ$$

► ใยแก้วนำแสง (fiber optics)



Endoscope fiber optics

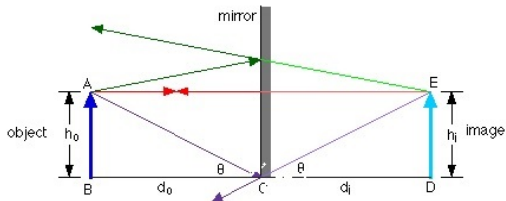


การเกิดภาพจากแสงสะท้อน และแสงหักเห

- ▶ หลักการเกิดภาพ จากกล้องรูเข็ม

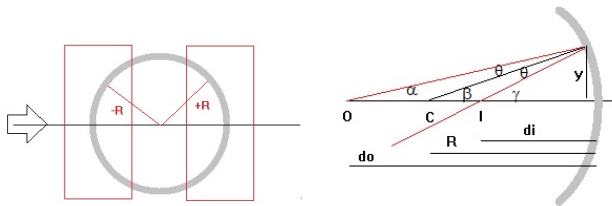


- ▶ การเกิดภาพจากกระจกราบ



$$\triangle ABC = \triangle CDE \mapsto d_o = d_i$$

- ▶ กระจกโค้ง คือส่วนหนึ่งของทรงกลมกระจก รัศมี R กระจกโค้งเว้า คือส่วนด้านหลัง รัศมี $+R$ กระจกโค้งนูน คือส่วนด้านหน้า รัศมี $-R$ (กระจกราบ คือกระจกโค้ง รัศมี $R = \infty$)



- ▶ การเกิดภาพจากกระจกโค้งเว้า

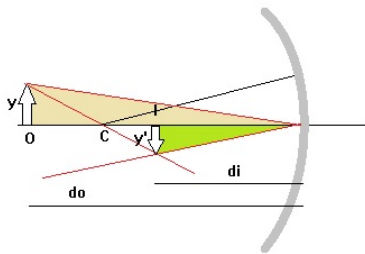
$$\alpha + \theta = \beta, \quad \beta + \theta = \gamma \mapsto \alpha + \gamma = 2\beta$$

$$\alpha = \tan \alpha = \frac{y}{d_o}, \quad \beta = \tan \beta = \frac{y}{R}, \quad \gamma = \tan \gamma = \frac{y}{d_i}$$

$$\mapsto \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{2}{R}$$

- ▶ กำลังขยายภาพ (magnification) m

สามเหลี่ยมเสมือน 2 รูป

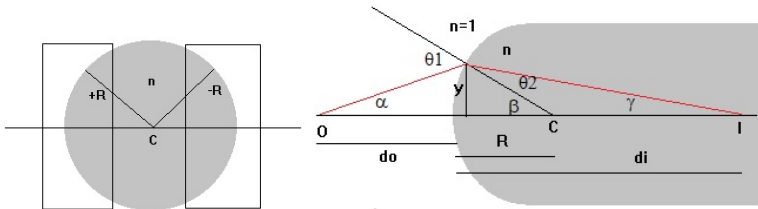


$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{d_i}{d_o}$$

- ▶ กรณีสัวอย่าง (วัดทุกระยะในหน่วย cm)

d_o	R	d_i	m	image(R/V)
20	+10	...	...	...
40	...	...	4	...
...	-20	...	1	...

- ▶ ผิวหักเหแสงแบบโค้ง เป็นส่วนหนึ่งของทรงกลมโปร่งแสง ดัชนีหักเห n รัศมี R ผิวด้านหน้าเป็นผิวโค้งนูน (รัศมี $+R$) ผิวด้านหลังเป็นผิวโค้งเว้า (รัศมี $-R$) (ผิวหักเหแสงแบบราบ คือผิวโค้ง รัศมี $R = \infty$)



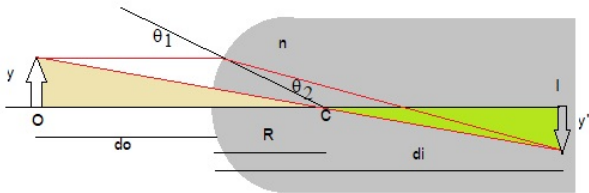
- ▶ การเกิดภาพจากแสงหักเหที่ผิวโค้งนูน $\theta_1 = \alpha + \beta$, $\theta_2 = \beta - \gamma$

$$\theta_1 \simeq n\theta_2 \mapsto \alpha + \beta = n(\beta - \gamma) \text{ or } \alpha + n\gamma = (n - 1)\beta$$

$$\alpha = \tan \alpha = \frac{y}{d_o}, \beta = \tan \beta = \frac{y}{R}, \gamma = \tan \gamma = \frac{y}{d_i}$$

$$\mapsto \frac{1}{d_o} + \frac{n}{d_i} = (n - 1)\frac{1}{R}$$

► กำลังขยายภาพ



จากสามเหลี่ยมเสมือน สองรูป

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{d_i - R}{d_o + R} = -\frac{d_i/n}{d_o}$$

$$\text{Note : } \frac{1}{d_o} + \frac{n}{d_i} = (n-1)\frac{1}{R} \mapsto \frac{1}{d_o} + \frac{1}{R} = n\left(\frac{1}{R} - \frac{1}{d_i}\right)$$

$$\frac{d_o + R}{d_o R} = -n\frac{(d_i - R)}{d_i R} \mapsto \frac{d_i - R}{d_o + R} = \frac{d_i/n}{d_o}$$

- ▶ กรณีตัวอย่าง (ทุกระยะทาง วัดในหน่วย cm)

d_o	R	n	d_i	m	$image(R/V)$
10	30	1.5	.....	.....	.....
15	-20	1.5	.....	.....	.....
.....	....	1.5	-20	2	.....

- ▶ กรณีแสงหักเหจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_1 เข้าสู่ ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเห n_2 สมการการเกิดภาพจะเปลี่ยนเป็น

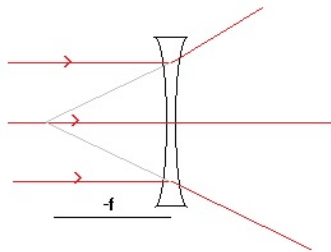
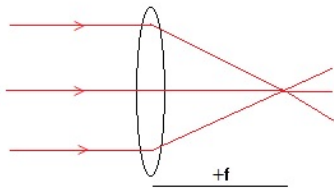
$$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_2}{d_i} = (n_2 - n_1) \frac{1}{R}, \quad m = -\frac{d_i/n_2}{d_o/n_1}$$

- ▶ กรณีตัวอย่าง

d_o	R	n_1	n_2	d_i	m	$image(R/V)$
10	30	1.5	1	.....	.....	.....
15	-20	1.5	1	.....	.....	.....

เลนส์บาง

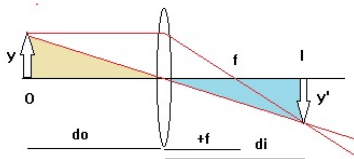
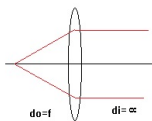
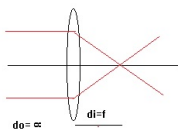
- ▶ เลนส์บาง เป็นตัวกลางโปร่งแสงที่มีผิวโค้งสองด้าน และมีความหนาของเลนส์น้อยมาก เอกลักษณ์ของเลนส์ คือระยะรวมแสง (focal length) f มีเลนส์บางสองชนิด คือ เลนส์รวมแสง ($+f$) และเลนส์กระจายแสง ($-f$)



- ▶ การเกิดภาพจากเลนส์บาง ($+f$) สมการเกิดภาพ คือ

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

- ▶ กำลังขยายภาพ คือ $m = \frac{y'}{y} = -\frac{d_i}{d_o}$

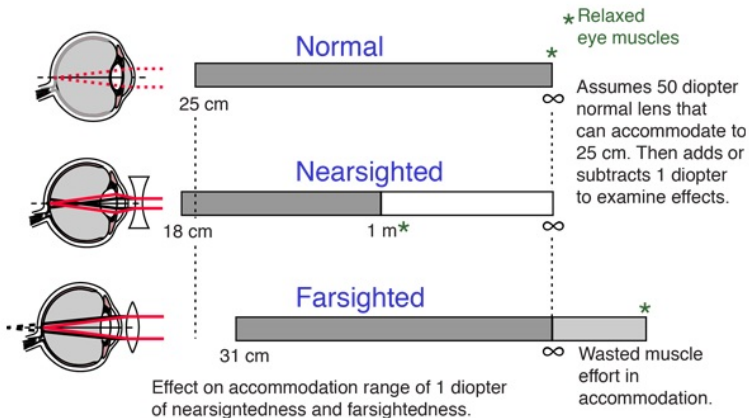


- ▶ กรณีสี่ตัวอย่าง

d_o	f	d_i	m	image(R/V)
20	+35	.....	.....	.....
.....	-20	.....	+2	.....

อุปกรณ์ทัศนศาสตร์

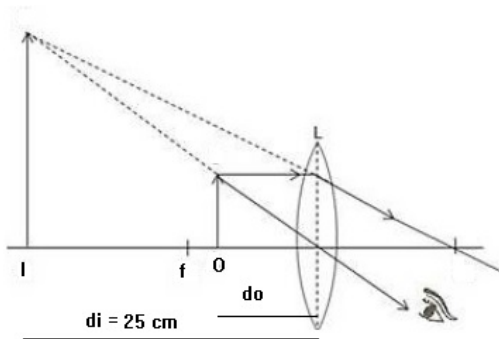
- ▶ การมองเห็นด้วยดวงตา ระยะมองสบาย คือ 25 cm



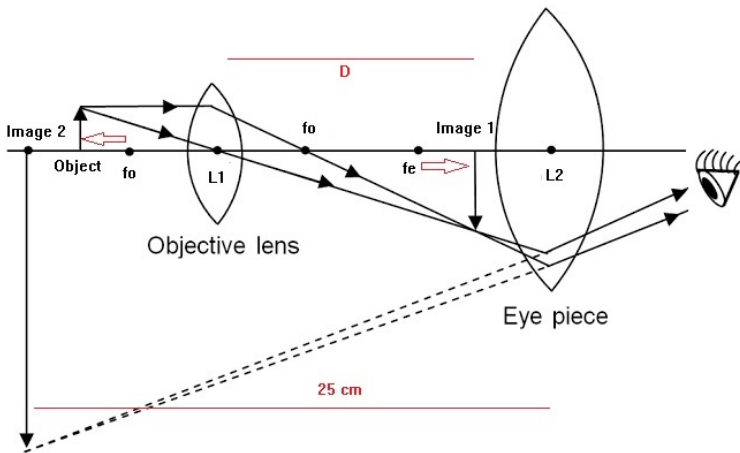
- ▶ อุปกรณ์ทัศนศาสตร์ เพิ่มความสามารถในการมองเห็น (วัตถุขนาดเล็ก)

► แว่นขยาย (magnifier)

$$d_i = 25\text{cm}, d_o \sim f \text{ (a bit lesser)} \mapsto m \sim +\frac{25}{f}$$

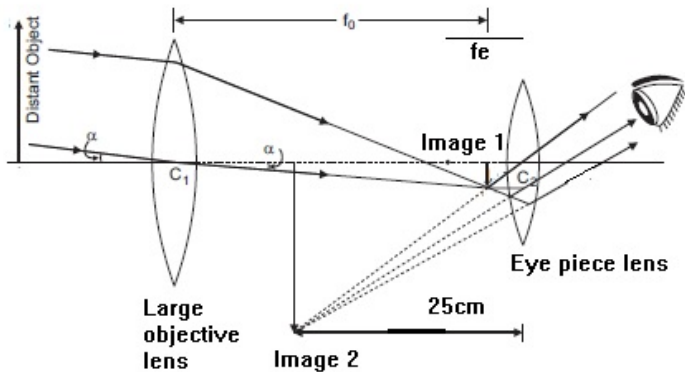


▶ กล้องจุลทรรศน์ (microscope)



$$m_o = -\frac{D}{f_o}, \quad m_e = \frac{25}{f_e} \rightarrow m_{tot} = m_o m_e = -\frac{25D}{f_o f_e}$$

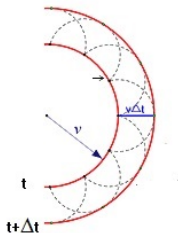
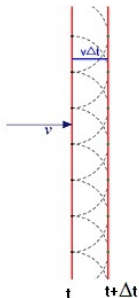
▶ กล้องมองไกล/ดูดาว (telescope)



$$m_{tot} \simeq m_e = \frac{25}{f_e}$$

คลื่นแสง และหลักการของฮอยเกนส์

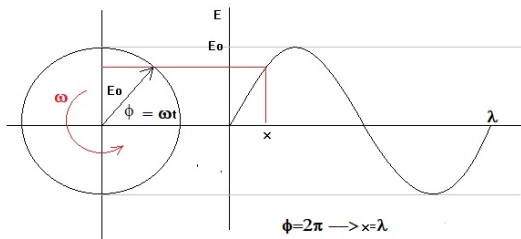
- ▶ หลักการของฮอยเกนส์ ทุกจุดบนแนวหน้าคลื่นแสง เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่



Library of Congress

การแทรกสอด

- ▶ มุมเฟสของคลื่นแสง

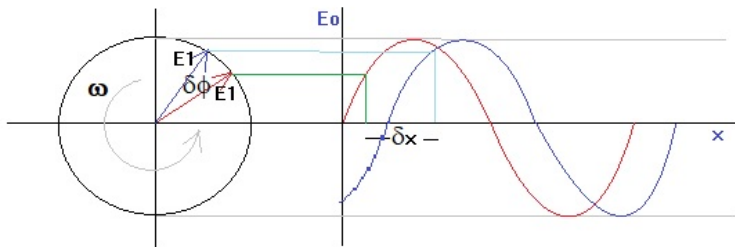


- ▶ การแทรกสอด = การซ้อนทับของคลื่นสองขบวน
- ▶ หลักการแทรกสอด

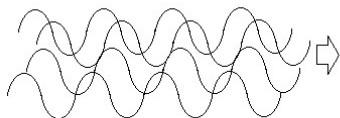
$$\frac{\Delta\phi}{2\pi} = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

เมื่อ $\Delta\phi$ คือความต่างมุมเฟส และ Δx ความต่างระยะทาง

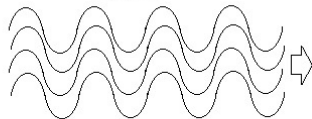
- ▶ แสงอาพันธ์ (coherence light) คือแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากัน และมีมุมเฟสตรงกัน เช่น เลเซอร์



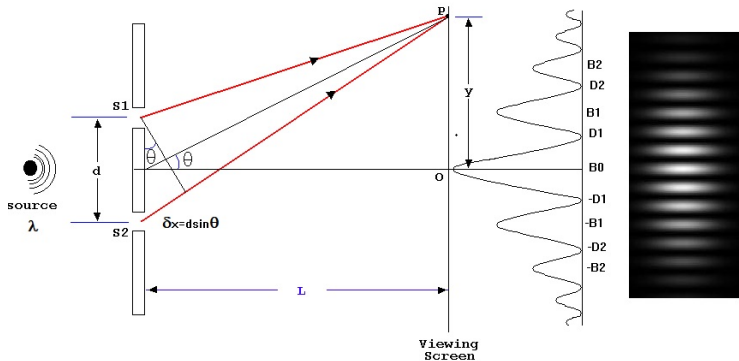
Monochromatic



Coherence



▶ การแทรกสอดจากช่องแคบคู่ (Young)



การแทรกสอดแบบเสริมสร้าง

$$\delta\phi = 2n\pi \mapsto d \sin \theta = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง

$$\delta\phi = (2n - 1)\pi \mapsto d \sin \theta = (n - 1/2)\lambda, \quad n = 1, 2, \dots$$

- ▶ ตำแหน่งฉากของแถบสว่าง / แถบมืด

$$\tan \theta \simeq \sin \theta = \frac{y}{L} \mapsto y = L \sin \theta$$

แถบสว่าง $y_{Bn} = \frac{nL\lambda}{d}$, $n = 0, 1, 2, \dots$

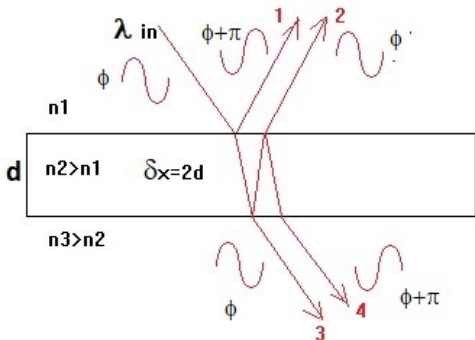
แถบมืด $y_{Dn} = \frac{(n-1/2)L\lambda}{d}$, $n = 1, 2, \dots$

- ▶ กรณีตัวอย่าง $\lambda = 640\text{nm}$, $d = 0.15\text{mm}$, $L = 2\text{m}$

$$y_{B1} = \frac{1 \cdot 2 \cdot 640 \times 10^{-9}}{1.5 \times 10^{-4}} = 8.53 \times 10^{-3}\text{m} = 8.53\text{mm}$$

$$y_{D1} = \frac{\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 640 \times 10^{-9}}{1.5 \times 10^{-4}} = 4.27 \times 10^{-3}\text{m} = 4.27\text{mm}$$

► การแทรกสอดจากฟิล์มบาง ที่มีความหนาสม่ำเสมอ



การแทรกสอดด้านหน้า และด้านหลัง ($\lambda_2 = \lambda/n_2$)

แบบเสริมสร้าง

$$\delta\phi = (2n - 1)\pi \mapsto 2d = (n - 1/2)\lambda_2, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$\text{แบบหักล้าง} \quad \delta\phi = 2n\pi \mapsto 2d = n\lambda_2, \quad n = 1, 2, \dots$$

► กรณีตัวอย่าง

ความหนาต่ำสุดของฟิล์มติดป้ายจราจร (สะท้อนแสง)

$$\lambda = 500nm, n_2 = 1.3 \mapsto d = \frac{1}{2} \frac{1}{2} 500 = 125nm = 0.125\mu m$$

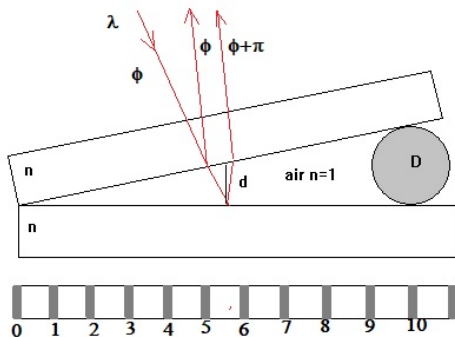
ความหนาต่ำสุดของฟิล์มติดอาคาร (ลดแสงสะท้อน)

$$\lambda = 500nm, n = 1.3 \mapsto d = \frac{1}{2} 500nm = 250nm = 0.25\mu m$$

ความหนาต่ำสุดของฟิล์มกรองแสงรถยนต์ (ลดความร้อน)

$$\lambda = 700nm, n = 1.3 \mapsto d = \frac{1}{2} 700nm = 350nm = 0.35\mu m$$

- ▶ การแทรกสอดจากฟิล์มบางที่มีความหนาไม่สม่ำเสมอ



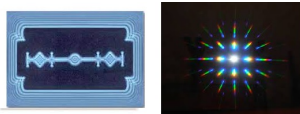
การแทรกสอดแบบหักล้าง

$$2d = n\lambda, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

- ▶ กรณีตัวอย่าง $\lambda = 640\text{nm} \mapsto D = \frac{1}{2} \cdot 10 \cdot 640\text{nm} = 3.2\mu\text{m}$

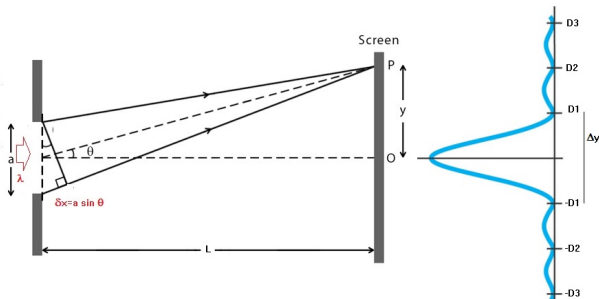
การเลี้ยวเบน

- ▶ ปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน



- ▶ การเลี้ยวเบนจากช่องแคบเดี่ยว

ตำแหน่งแถบมืดบนฉาก $a \sin \theta = n\lambda$, $y_n = \frac{nL\lambda}{a}$

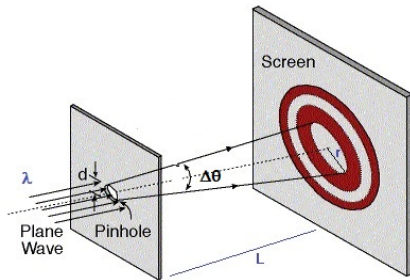


- ▶ กรณีตัวอย่าง $a = 0.05\text{mm}$, $\lambda = 640\text{nm}$, $L = 2\text{m}$

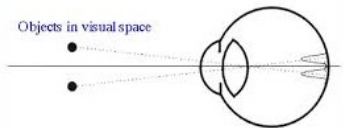
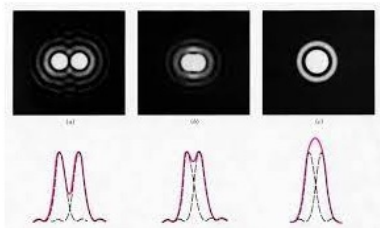
$$y_1 = \frac{2 \cdot 640\text{nm}}{0.05\text{mm}} = 2.56\text{cm} \mapsto \Delta y_1 = 2(2.56\text{cm}) = 5.12\text{cm}$$

- ▶ การแทรกสอดจากกรวยเปิดเดี่ยว เส้นผ่าศูนย์กลางกลาง d

$$\Delta\theta = \frac{1.22\lambda}{d} \simeq \frac{2r}{L}$$



► กำลังการแยกแยะ (resolving power)



$$\text{resolving power} = \frac{1}{\Delta\theta} = \frac{d}{1.22\lambda}$$

A Sunday Afternoon on the Island of La Grande Jatte by Restored Vintage Shop

