



หน่วยที่ 7

ทัศนศาสตร์

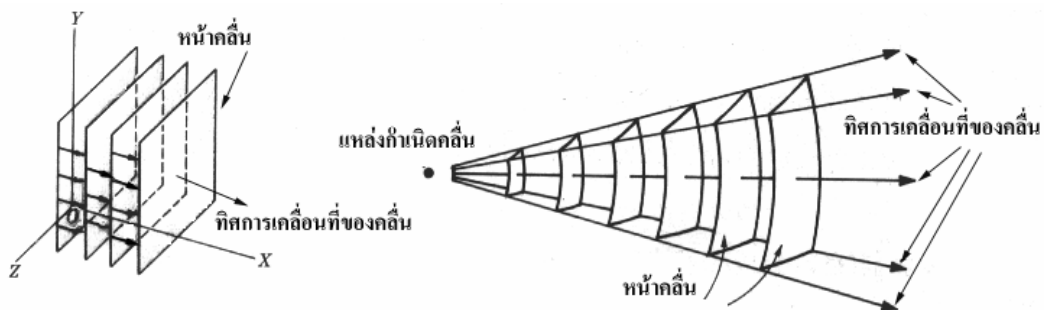
7.1 ธรรมชาติของแสง การสะท้อน และการหักเห

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทหนึ่ง สามารถเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศได้ด้วยความเร็วเท่ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น คือ 3×10^8 เมตร/วินาที และมีสมบัติเหมือนกับคลื่นตามขวางทั่ว ๆ ไป คือมีการสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) การเลี้ยวเบน (diffraction) การแทรกสอด (interference) และโพลาไรเซชัน (polarization)

ในความคิดของนักวิทยาศาสตร์ปัจจุบัน เชื่อว่าแสงมีสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค แสงประพฤติตัวเป็นคลื่นพบได้ในปรากฏการณ์การแทรกสอดของยัง (Young) ทฤษฎีหน้าคลื่นของฮอยเกนส์ใช้อธิบายการสะท้อนและการหักเห สมบัติความเป็นคลื่นของแสงใช้อธิบายการทดลองการเลี้ยวเบนของเฟรสเนล (Fresnel) แต่สมบัติความเป็นคลื่นไม่สามารถนำไปใช้อธิบายการเกิดอิเล็กตรอนอิสระบนผิวโลหะเมื่อแสงตกกระทบ ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์คอมป์ตัน และไม่สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำได้ครบสมบูรณ์ ปรากฏการณ์เหล่านี้ต้องใช้สมบัติความเป็นอนุภาคของแสงอธิบายโดยตั้งสมมติฐานว่าแสงเป็นอนุภาคไร้มวล เรียกว่า โฟตอน พลังงานของโฟตอน 1 ตัวมีค่าเท่ากับ hf เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์ (planck's constant) มีค่าเท่ากับ 6.63×10^{-34} จูล·วินาที และ f เป็นความถี่ของแสง สมมติฐานที่ให้แสงเป็นอนุภาคสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมา

ในหน่วยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะสมบัติความเป็นคลื่นของแสง คลื่นแสงขบวนหนึ่ง ๆ เราสามารถแทนด้วยเส้นตรงในแนวทิศการเคลื่อนที่ เรียกเส้นนี้ว่า รังสี (ray) ของแสง รังสีของแสงจะตั้งฉากกับหน้าคลื่น (wavefront) ของแสง

การหาหน้าคลื่นใหม่ของแสงสามารถทำได้โดยวิธีทางเรขาคณิต เรียกว่า หลักของฮอยเกนส์ (Huygen's principle) กล่าวว่าทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่นถือว่าเป็นต้นกำเนิดคลื่นทุติยภูมิ (secondary wave) ที่แผ่ออกไปด้วยความเร็วเท่าเดิมในตัวกลางเดิม เส้นสัมผัสที่ลากผ่านตำแหน่งเหล่านี้เป็นหน้าคลื่นใหม่



รูป 7.1 (ก) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นระนาบ

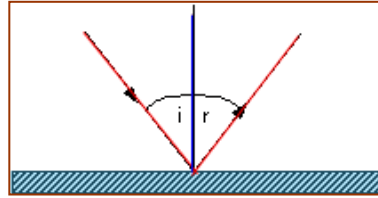
(ข) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นแบบทรงกลม



7.1.1 การสะท้อนของแสง

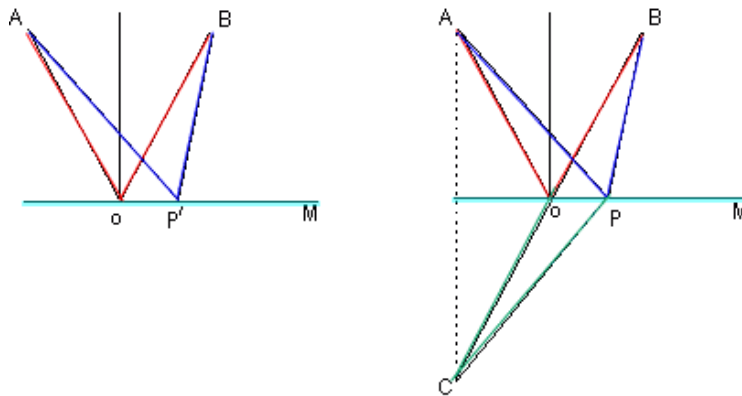
เมื่อคลื่นแสงเดินทางตกกระทบบัวกลางอีกชนิดหนึ่ง แสงบางส่วนหรือทั้งหมดจะสะท้อนกลับไม่ว่าผิวที่ตกกระทบบจะขรุขระหรือเป็นผิวโค้ง หรือเป็นผิวเรียบก็ตาม หลักการสะท้อนแสงจะเป็นไปตามกฎการสะท้อนแสง 2 ข้อ ดังนี้

1. รังสีตกกระทบบและรังสีสะท้อนจะอยู่ในระนาบเดียวกันเสมอ
2. มุมตกกระทบบ (angle of incident) จะเท่ากับมุมสะท้อน (angle of reflection)



รูป 7.2 การสะท้อนของแสง

จากรูป 7.3 แสงเดินทางจากจุด A ตกกระทบบผิวรอยต่อที่จุด O แล้วสะท้อนมาที่จุด B ทำให้มุมตกกระทบบ (i) เท่ากับมุมสะท้อน (r)



รูป 7.3 แสงสะท้อนจากจุด A ไปยัง B โดย AOB เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด

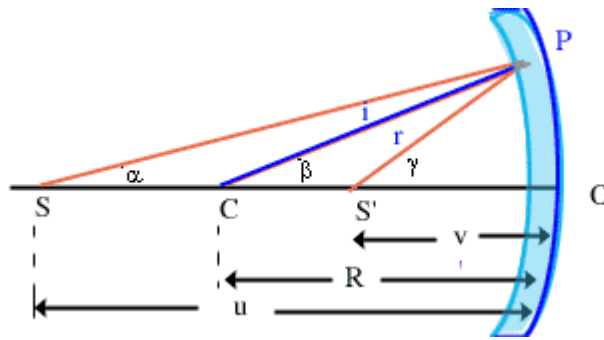
ถ้าแสงตกกระทบบที่จุด P ผลก็คือมุม i ไม่เท่ากับมุม r ธรรมชาติของแสงรู้ได้อย่างไรว่าจะต้องมาตกกระทบบที่จุด O ได้เพียงจุดเดียวเท่านั้น

ถ้าผิวตกกระทบบ M เป็นกระจก ทำให้เกิดจุด C อยู่ห่างจากผิวกระจกเท่ากับระยะของ A เส้น รังสี AOB คือเส้นทางที่แสงเดินทางได้จริง รังสี APB เป็นรังสีสมมติที่เกิดจากแสงย้าย จุด P สะท้อนไปยังจุด B จากวิชาเรขาคณิตจะเห็นว่า $AO = CO$ และ $AP = CP$ รังสี AOB จึงแทนได้ด้วยรังสี COB รังสี APB แทนได้ด้วยรังสี CPB



จะเห็นว่า COB สั้นกว่า CPB (ในสามเหลี่ยม BCP ด้าน 2 ด้านของสามเหลี่ยมรวมกันย่อมยาวกว่าด้านที่สาม) หรือรังสี AOB มีทางเดินที่สั้นกว่ารังสี APB กฎการสะท้อนแสงอาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่าการที่แสงเดินทางจากจุดหนึ่ง(A)ไปยังอีกจุดหนึ่ง(B) โดยอาศัยวิธีสะท้อนบนตัวกลาง ปรากฏการณ์การสะท้อนจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เส้นทางเดินของแสงระหว่างจุด 2 จุดนั้นโดยวัดผ่านจุดตกกระทบมีระยะทางสั้นที่สุด แต่แสงมีความเร็วคงที่ จึงกล่าวได้อีกว่า แสงจะเดินทางเป็นไปตามกฎการสะท้อน โดยที่ระยะทางนั้นเป็นระยะทางที่แสงใช้เวลาเดินทางน้อยที่สุด

เราสามารถประยุกต์กฎการสะท้อนแสง อธิบายการเกิดภาพของกระจกโค้ง (Spherical mirror) เริ่มด้วยกระจกโค้งเว้า



รูป 7.4 แสดงรังสีของแสงที่กระจกโค้งเว้า

ให้ S เป็นวัตถุหรือแหล่งกำเนิดแสง รังสีจากวัตถุ (SP) จะตกกระทบที่ผิวโค้งที่จุด P C คือจุดศูนย์กลางของความโค้งของกระจก (Center of curvature) CP คือเส้นปกติ รังสีสะท้อน S'P จะตัดกับแกนของกระจกที่จุด S' ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เกิดภาพมุมตกกระทบ $i =$ มุมสะท้อน r

จะหาความสัมพันธ์ของระยะวัตถุ (u) ระยะภาพ (v) และรัศมีความโค้งได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{สามเหลี่ยม } S'CP : \quad \gamma &= \beta + r \\ \text{หรือ} \quad r &= \gamma - \beta \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(7.1)$$

$$\text{สามเหลี่ยม } SCP \quad i = \beta - \alpha \quad \dots\dots\dots(7.2)$$

สมการ (7.1) เท่ากับสมการ (7.2) เพราะมุม $i =$ มุม r

α, β, γ ไม่สามารถใช้หาความสัมพันธ์ของระยะต่าง ๆ ได้โดยตรง จึงกำหนดเงื่อนไขให้ α, β, γ เป็นมุมที่มีค่าน้อย ๆ และกระจกโค้งมีรัศมีความโค้งมากจนประมาณได้ว่า เส้นโค้ง OP กับเส้นตรง OP คือเส้นเดียวกัน

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= OP/SO \approx OP/u \\ \tan \beta &= OP/CO \approx OP/R \\ \tan \gamma &= OP/S'O \approx OP/v \end{aligned}$$



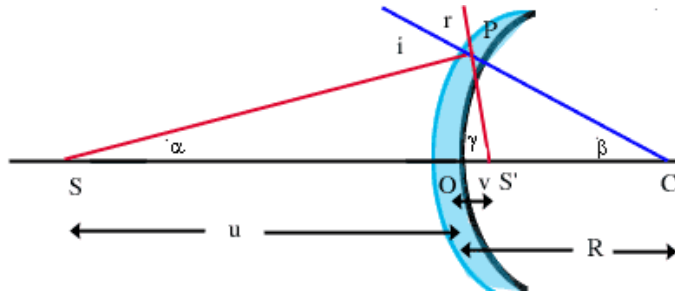
เพราะมุมมีค่าเล็กมาก ๆ จะได้ค่า \tan ของมุมเล็ก ๆ นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าของมุมในหน่วยเรเดียน
จากสมการ (7.1) และ (7.2) จะได้

$$\beta - \alpha = \gamma - \beta$$

$$\frac{OP}{R} - \frac{OP}{u} = \frac{OP}{v} - \frac{OP}{R}$$

จะได้
$$\frac{2}{R} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad \dots\dots\dots(7.3)$$

กรณีที่เป็นกระจกโค้งนูนสามารถหาความสัมพันธ์โดยวิธีเดียวกัน

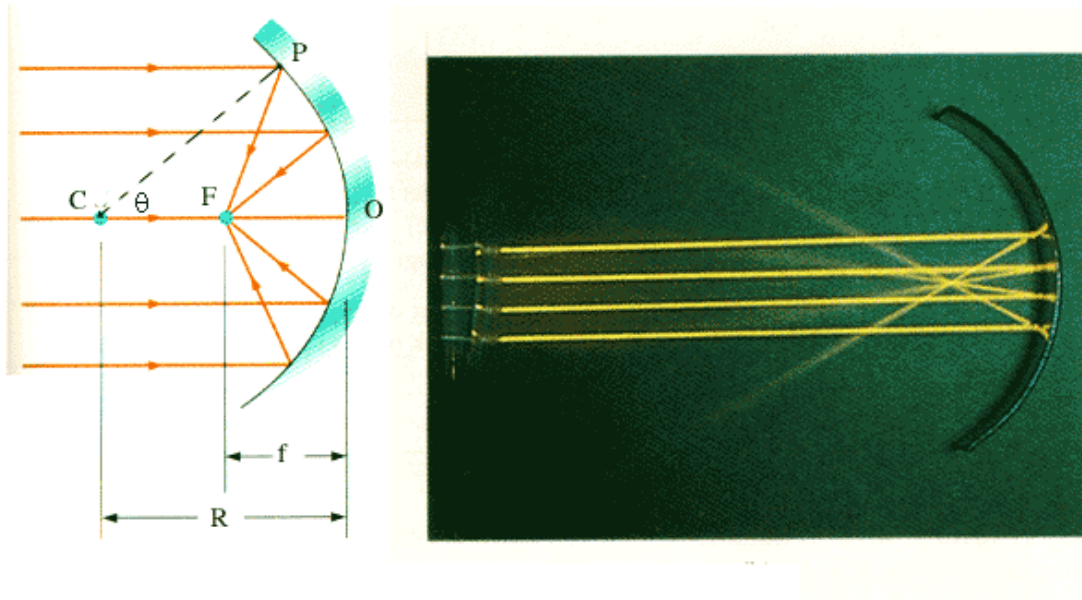


รูป 7.5 รังสีตกกระทบและรังสีสะท้อนบนกระจกโค้งนูน

จะได้สูตร
$$\frac{-2}{R} = \frac{1}{u} - \frac{1}{v} \quad \dots\dots\dots(7.4)$$

จากสมการ (7.3) และ (7.4) สรุปการใช้เครื่องหมายเพื่อจำแนกชนิดกระจกได้ดังนี้

1. ระยะวัตถุ (u) จะมีค่าเป็น + เมื่อวัตถุอยู่ด้านเดียวกับแสงที่ตกกระทบกระจก
2. ระยะภาพ (v) จะเป็น + เมื่อเป็นภาพจริง เป็นลบเมื่อเป็นภาพเสมือน
3. R จะเป็นบวกเมื่อเป็นกระจกโค้งเว้า เป็นลบเมื่อเป็นกระจกโค้งนูน



รูป 7.6 เมื่อรังสีขนานตกกระทบบนกระจกโค้ง

ถ้ารังสีตกกระทบบนกระจกเป็นรังสีขนาน รังสีทั้งหลายจะสะท้อนไปรวมกันที่จุด ๆ หนึ่งเรียกว่าจุดโฟกัส (focal point) ให้กระจกมีรัศมีมีความโค้งมากจนถือว่า OP เป็นเส้นตรง

พิจารณา $\triangle OCP$ และ $\triangle OFP$

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{OP}{OC}$$

$$\tan 2\theta \approx 2\theta = \frac{OP}{OF}$$

จะได้ $OC = 2OF$ หรือ $f = \frac{R}{2}$ (7.5)

7.1.2 การหักเหของแสง

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน พบว่า

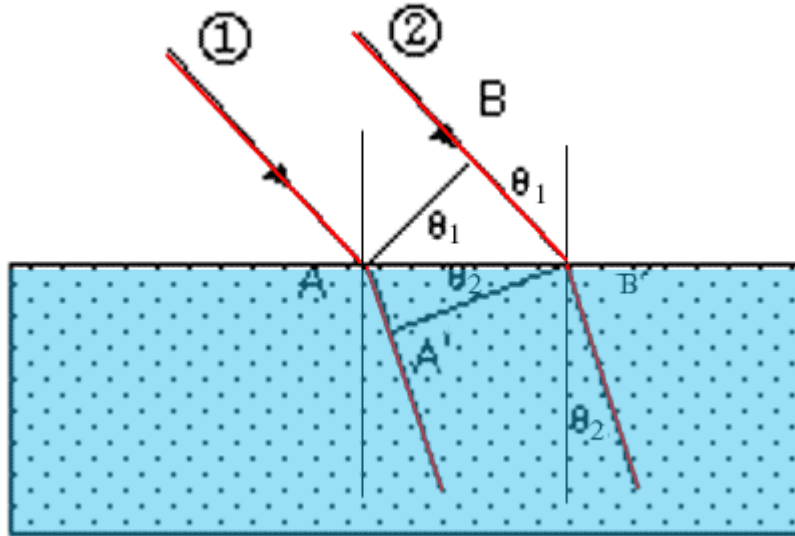
1. ความเร็ว ความยาวคลื่นของแสงจะเปลี่ยนไป แต่ความถี่จะไม่เปลี่ยน

2. แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติ เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย

สู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย

3. แสงจะเดินทางผ่านตัวกลางเป็นเส้นตรง (ไม่มีการหักเห) เมื่อมุมตกกระทบบน $= 0^\circ$

เราสามารถอธิบายการหักเหของแสงได้ดังนี้ ให้แสงขนานตกกระทบบนรอยต่อของตัวกลาง ทำมุมตกกระทบบน $= \theta_1$ ความเร็วของแสงในอากาศ คือ c_1 แสงหักเหในตัวกลางที่ 2 ทำมุมหักเหเท่ากับ θ_2 ความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 2 เป็น c_2



รูป 7.7 แสงหักเหเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน

พิจารณารังสี 2 เส้น เส้น ① และ ② รังสี ① ตกกระทบที่ผิวรอยต่อตรงจุด A ขณะที่รังสี ② ไปถึงจุด B ขณะที่รังสี ① ตกกระทบผิวรอยต่อที่จุด B' รังสี ② จะเคลื่อนมาถึงจุด A' แสงใช้เวลา Δt เท่ากันในการเดินทางจาก A ถึง A' และจาก B ถึง B' แต่ระยะ AA' น้อยกว่า BB' (เพราะแสงมีความเร็วเปลี่ยนไป)

ให้ θ_1 เป็นมุมตกกระทบ θ_2 เป็นมุมหักเห

$$\text{จากรูป 7.7 จะได้ } \sin \theta_1 = \frac{BB'}{AB'}, \quad \sin \theta_2 = \frac{AA'}{AB'}$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{BB'}{AA'} = \frac{c_1 \Delta t}{c_2 \Delta t} = \frac{c_1}{c_2}$$

$$\text{หรือ } \frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2} \quad \dots\dots\dots(7.6)$$

เรียกสมการนี้ว่ากฎของสเนล(Snell's law) ให้ n เป็นดัชนีหักเหของตัวกลางใด ๆ เทียบกับสุญญากาศ โดยนิยาม

$$n = \frac{\text{ความเร็วของแสงในสุญญากาศ}}{\text{ความเร็วของแสงในตัวกลางนั้น}}$$

สมการ (7.6) เขียนให้อยู่ในรูปดัชนีหักเหได้เป็น

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \dots\dots\dots(7.7)$$

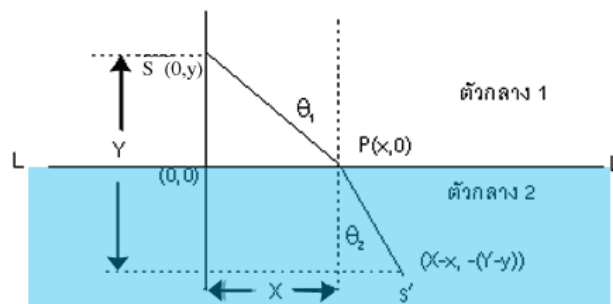


ตาราง 7.1 ความเร็วของแสง และดัชนีหักเหของสารต่าง ๆ (เมื่อใช้แสงสีเหลืองผ่าน)

ชื่อสาร	ความเร็ว($\times 10^8$ m/s)	ดัชนีหักเห (c/v)
สุญญากาศ	$c = 2.997925$	1.0
อากาศ	2.99706	1.00029
คาร์บอนไดออกไซด์	2.99658	1.00045
ฮีเลียม	2.99782	1.000034
น้ำ (20° ซ)	2.2490	1.3330
เอทิลแอลกอฮอล์	2.2016	1.3617
เมทิลแอลกอฮอล์	2.2555	1.3292
เบนซิน	1.9968	1.5014
คาร์บอนไดซัลไฟด์	1.8415	1.6279
น้ำเชื่อม 50%	2.1112	1.4200
แก้ว, light crown	1.976	1.517
แก้ว, dense crown	1.888	1.588
แก้ว, light flint	1.899	1.579
แก้ว, heavy flint	1.820	1.647
ฟลูออไรท์	2.091	1.434
เพชร	1.240	2.417

ในเรื่องการสะท้อนของแสง แสงจะใช้ระยะที่สั้นที่สุดหรือใช้เวลาน้อยที่สุดในการเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หลักการนี้จะใช้กับกฎของสเนลได้หรือไม่

หลักการที่ว่าแสงเดินทางหักเหในระยะทางที่สั้นที่สุด เห็นจะใช้ไม่ได้แน่ เพราะจากรูป 7.8 จะเห็นได้ว่า รังสีจาก S ไปยัง S' โดยหักเหผ่านผิว LL' ระยะ SPS' จึงไม่ใช่ระยะที่สั้นที่สุด จึงเหลือหลักการที่ใช้เวลาน้อยที่สุดที่จะนำมาพิจารณา



รูป 7.8 แผนภาพการหักเหของแสง



ให้ c_1 เป็นความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 1

c_2 เป็นความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 2

$$\begin{aligned} \text{เวลาที่แสงเดินทางจาก S ถึง P} &= t = \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{c_1^2}} \\ \text{เวลาที่แสงเดินทางจาก P ถึง S'} &= t' = \sqrt{\frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{c_2^2}} \\ \text{เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ทั้งหมด T} &= t + t' \\ &= \sqrt{\frac{x^2 + y^2}{c_1^2}} + \sqrt{\frac{(X-x)^2 + (Y-y)^2}{c_2^2}} \end{aligned}$$

P เป็นตำแหน่งต่าง ๆ บน LL' จะเลื่อนจุด P ไปที่ค่า x ใด ๆ ที่จะทำให้แสงใช้เวลาจาก S ไป P และจาก P ไป S' ใช้เวลาน้อยที่สุด

$$\frac{dT}{dx} = 0 = \frac{x}{c_1 \sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{(X-x)}{c_2 \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2}}$$

$$\text{แต่ } \sin \theta_1 = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \sin \theta_2 = \frac{(X-x)}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2}}$$

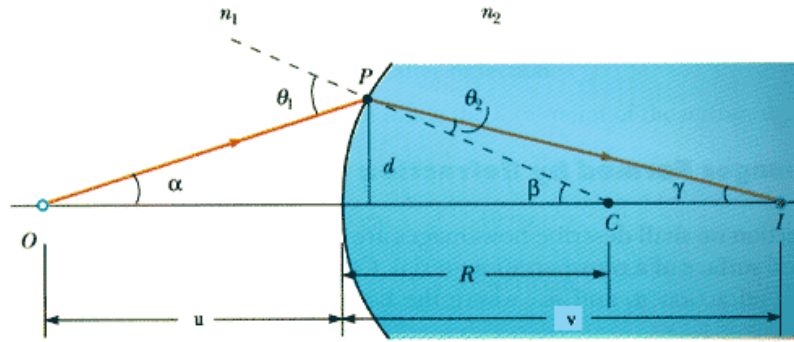
$$\text{จะได้ } \frac{\sin \theta_2}{c_1} = \frac{\sin \theta_1}{c_2}$$

เป็นเงื่อนไขที่ทำให้แสงใช้เวลาเดินทางน้อยที่สุด จะเห็นว่าสอดคล้องกับกฎของสเนล เราเรียกกฎนี้ว่า หลักการของเฟอร์เมท (Fermat's principle) ตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสซึ่งตั้งกฎนี้

เมื่อแสงตกกระทบผิวรอยต่อบนตัวกลางที่มีผิวโค้ง สามารถใช้หลักการหักเหแสงอธิบายการเกิดภาพได้

จากภาพเป็นตัวกลาง 2 ชนิด มีค่าดัชนีหักเหเป็น n_1 และ n_2 ตามลำดับ ให้ $n_1 < n_2$ (n_1 อาจเป็นอากาศ, n_2 อาจเป็นแก้วที่มีผิวโค้ง) O เป็นวัตถุวางอยู่หน้าผิวโค้ง แสงจาก O จะตกกระทบตรงรอยต่อที่จุด P ใด ๆ ด้วยมุม θ_1 จะหักเหในตัวกลางที่ 2 ทำมุมหักเห θ_2 เกิดภาพที่ตำแหน่ง I

ให้รัศมีความโค้งของผิวรอยต่อมีค่ามาก ๆ = R มุม α, β และ γ เป็นมุมเล็ก



รูป 7.9 การเกิดภาพที่ผิวโค้งนูน

ความสัมพันธ์ระหว่าง $\theta_1, \theta_2, \alpha, \beta, \gamma$

คือ $\theta_1 = \alpha + \beta$

$\beta = \theta_2 + \gamma$

หรือ $\theta_2 = \beta - \gamma$

จากกฎของสเนล $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

เมื่อ θ_1 และ θ_2 เป็นมุมเล็กๆ

แทนค่า θ_1, θ_2

$$n_1(\alpha + \beta) = n_2(\beta - \gamma)$$

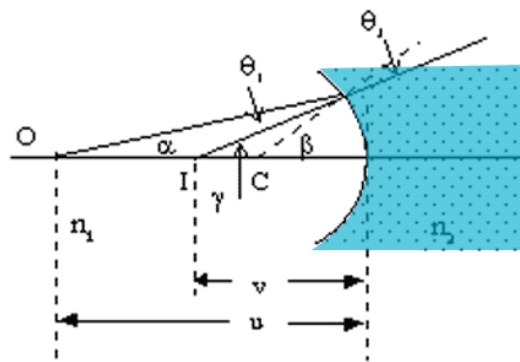
$$n_1\alpha + n_2\gamma = (n_2 - n_1)\beta$$

เพราะว่า $\alpha = \frac{PV}{u}$, $\beta = \frac{PV}{R}$, $\gamma = \frac{PV}{v}$

จะได้

$$\frac{n_1}{u} + \frac{n_2}{v} = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad \dots\dots\dots(7.8)$$

ถ้าผิวรอยต่อเป็นผิวโค้งเว้า



รูป 7.10 การเกิดภาพที่ผิวโค้งเว้า



$$\beta = \theta_1 + \alpha \rightarrow \theta_1 = \beta - \alpha$$

$$\beta = \theta_2 + \gamma \rightarrow \theta_2 = \beta - \gamma$$

จากกฎของสเนล $n_1 \theta_1 \approx n_2 \theta_2$

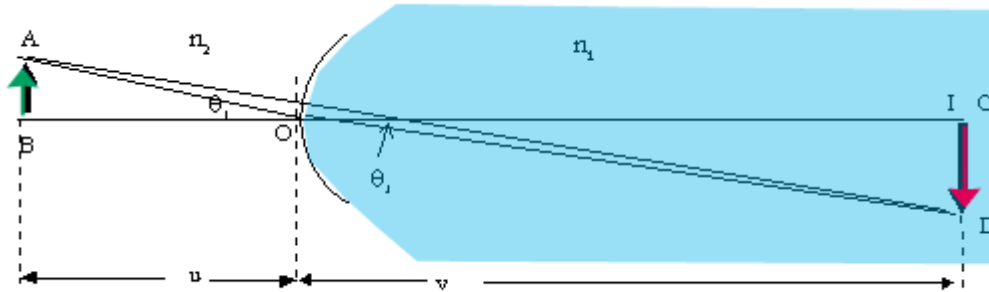
$$n_1(\beta - \alpha) = n_2(\beta - \gamma)$$

$$-(n_1 \alpha + n_2 \beta) = (n_2 - n_1)\beta$$

$$\frac{n_1}{u} + \frac{n_2}{v} = \frac{n_2 - n_1}{-R} \dots\dots\dots(7.9)$$

จะได้สูตรเหมือนกับใช้ผิวโค้งนูนรับแสง ต่างกันเพียงค่า R เป็นลบ

ตัวอย่าง 7.1 กำหนดให้ $n_1 = 1$, $n_2 = 1.5$ รัศมีความโค้ง $R = 0.1$ เมตร จงหาตำแหน่งภาพของวัตถุ AB ซึ่งอยู่ห่างจากจุด O เป็นระยะ 0.3 เมตร



รูป 7.11 ตัวกลางผิวโค้งนูนในตัวอย่าง 7.1

วิธีทำ เนื่องจากใช้ผิวโค้งนูนรับแสงจากสมการ 7.8

$$\frac{n_1}{u} + \frac{n_2}{v} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

แทนค่า n_1 , n_2 $u = 0.3$ เมตร, $R = 0.1$ เมตร

จะได้ $v = 0.89$ เมตร

จากตัวอย่าง 7.1 ถ้าต้องการหากำลังขยายของผิวโค้ง สามารถหาได้จาก

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{ขนาดของภาพ}}{\text{ขนาดของวัตถุ}} = \frac{AB}{CD}$$



$$= \frac{v \tan \theta_2}{u \tan \theta_1}$$

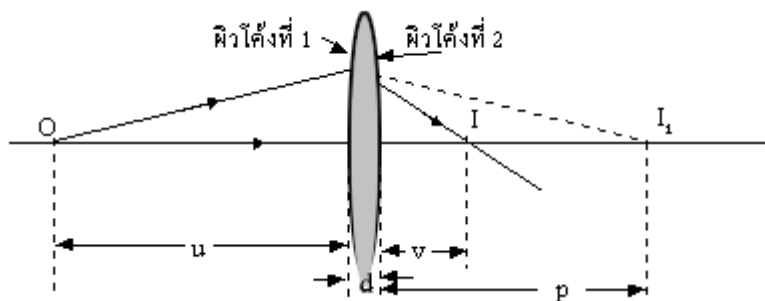
$$\text{ถ้า } \theta_1 \text{ และ } \theta_2 \text{ มีค่าน้อย ๆ } \cong \frac{v \sin \theta_2}{u \sin \theta_1}$$

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปดัชนีหักเหได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย } \cong \frac{v n_1}{u n_2} \dots\dots\dots(7.10)$$

เลนส์บางทำด้วยแก้วหรือพลาสติกใส ผิวเป็นส่วนโค้งของทรงกลมทั้งสองด้าน หรือเป็นผิวระนาบด้านหนึ่ง ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะเลนส์ที่ผิวโค้งทั้งสองอยู่ติดกันมากจนไม่ต้องคำนึงถึงความหนาของเลนส์

เมื่อวางวัตถุห่างจากเลนส์เป็นระยะ u ที่จุด O เลนส์มีรัศมีความโค้งที่ผิวที่ 1 เป็น R_1 และผิวโค้งที่สองเป็น R_2 แสงจากวัตถุจะหักเหผ่านผิวโค้งที่ 1 ทำให้เกิดภาพที่ตำแหน่ง I_1 ห่างจากผิวโค้งเป็นระยะ p ภาพ I_1 นี้จะเป็นวัตถุสำหรับผิวโค้งที่ 2 แสงจากภาพ I_2 จะผ่านผิวโค้งที่ 2 เกิดเป็นภาพสุดท้ายที่ตำแหน่ง I ซึ่งห่างจากเลนส์เป็นระยะ v ดังรูปที่ 7.12



รูป 7.12 การเกิดภาพของเลนส์บาง

ให้เลนส์นี้วางอยู่ในตัวกลางซึ่งมีดัชนีหักเหเท่ากับ n_s วัสดุที่ใช้ทำเลนส์มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ n ผิวโค้งที่ 1 ใช้ส่วนโค้งนูนเป็นส่วนรับแสง ค่า R_1 จึงมีค่าเป็นบวก ความหนา (d) ของเลนส์น้อยมากจนตัดทิ้งได้ อาศัยสมการ (7.8) จะได้

$$\frac{n_s}{u} + \frac{n}{p} = \frac{n - n_s}{R_1} \dots\dots\dots(7.11)$$

เมื่อแสงหักเหผ่านผิวโค้งที่ 1 จะกระทบกับผิวโค้งที่ 2 ซึ่งใช้ส่วนเว้ารับแสง ค่า R_2 จึงมีค่าเป็นลบ วัตถุในกรณีนี้คือภาพที่เกิดจากผิวโค้งที่ 1 จึงเป็นวัตถุเสมือนมีค่าเป็นลบเช่นกัน

$$\frac{n}{-p} + \frac{n_s}{v} = \frac{n_s - n}{-R_2} \dots\dots\dots(7.12)$$

นำสมการ (7.11) บวกกับสมการ (7.12)



$$\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{n - n_s}{n_s} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \dots\dots\dots(7.13)$$

เรียกสมการ (7.13) ว่าเป็นสมการของเลนส์บาง (thin lens equation) เทอมด้านซ้ายมือสามารถแทนได้ด้วย $\frac{1}{f}$ เมื่อ f คือความยาวโฟกัสของเลนส์

ปริมาณ $\frac{1}{f}$ เรียกว่าเป็นกำลังของเลนส์ เป็นตัวบอกความสามารถของเลนส์ที่จะทำให้แสงหักเหออกจากเลนส์ เบี่ยงเบนไปจากแนวของรังสีตกกระทบได้มากน้อยเพียงใด ถ้า f ของเลนส์มีค่าน้อย มุมเบี่ยงเบนจะมีค่ามาก นั่นคือ กำลังของเลนส์จะมีค่ามาก หน่วยวัดกำลังของเลนส์คือไดออปเตอร์ (diopter) โดยที่ความยาวโฟกัสของเลนส์ต้องมีหน่วยเป็นเมตร

ตัวอย่าง 7.2 เลนส์บาง 2 ชิ้นประกบกัน เลนส์ชิ้นที่หนึ่งเป็นเลนส์นูนมีรัศมีความโค้ง 16 เซนติเมตร และ 24 เซนติเมตร ดัชนีหักเหของเลนส์เท่ากับ 1.6 เลนส์ชิ้นที่สองเป็นเลนส์เว้ารัศมีความโค้ง 32 เซนติเมตร และ 48 เซนติเมตร ดัชนีหักเหเท่ากับ 1.48 จงหาความยาวโฟกัสรวม และกำลังของเลนส์ชุดนี้

วิธีทำ ให้ f_1, f_2 เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูนและเลนส์เว้าตามลำดับ

$$\frac{1}{f_1} = (1.6 - 1) \left(\frac{1}{16} + \frac{1}{24} \right)$$

$$f_1 = 16 \text{ เซนติเมตร}$$

และ $\frac{1}{f_2} = (1.48 - 1) \left(\frac{-1}{32} - \frac{1}{48} \right)$

$$f_2 = -40 \text{ เซนติเมตร}$$

ให้ F เป็นความยาวโฟกัสรวมของเลนส์ทั้งสอง

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

$$= \frac{1}{16} - \frac{1}{40}$$

$$F = +26.67 \text{ เซนติเมตร หรือ } 0.2667 \text{ เมตร}$$

กำลังของเลนส์ $= \frac{1}{F}$

$$= \frac{1}{0.2667}$$

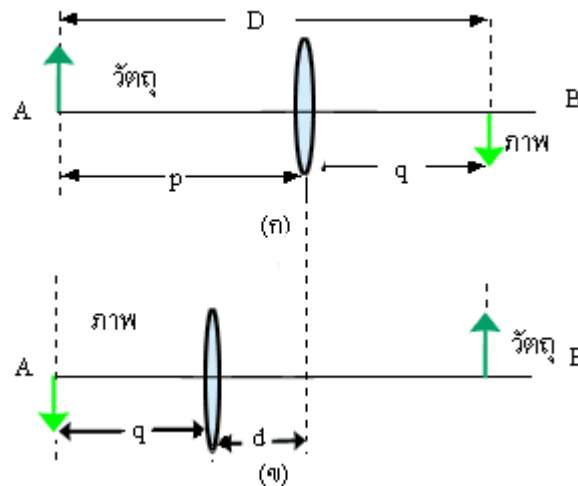
$$= +3.75 \text{ ไดออปเตอร์}$$



ตัวอย่าง 7.3 โฟกัสสังยุค (conjugate foci) คือจุดสองจุด คือ A และ B ซึ่งบอกตำแหน่งของวัตถุและตำแหน่งภาพ, ตำแหน่งวัตถุและภาพทั้งสองนี้สามารถสลับกันได้ โดยการเลื่อนตำแหน่งเลนส์ไปจากเดิมเป็น

ระยะ d จะแสดงว่าความยาวโฟกัสของเลนส์นั้นคือ $f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$

วิธีทำ



รูป 7.13 การเกิดโฟกัสสังยุค

รูป 7.13 (ก) ระยะวัตถุ (p) และระยะภาพ (q) มีความสัมพันธ์กับระยะ AB ดังนี้

$$D = p + q$$

รูป 7.13 (ข) เมื่อสลับตำแหน่งภาพและวัตถุต้องเลื่อนเลนส์ไปจากเดิม d

$$d = p - q$$

จะได้ระยะวัตถุ $p = \frac{(D+d)}{2}$

ระยะภาพ $q = \frac{(D-d)}{2}$

ความยาวโฟกัสของเลนส์ คือ

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{D+d} + \frac{2}{D-d}$$

$$f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$$

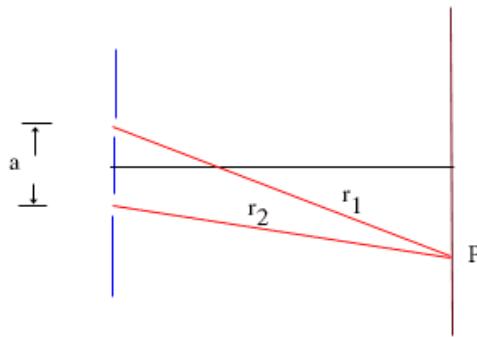


7.2 การแทรกสอดและการเลี้ยวเบน (Interference and Diffraction)

7.2.1 การรวมคลื่น

การแทรกสอดของคลื่นเกิดจากคลื่นตั้งแต่ 2 ขบวนขึ้นไปมาพบกันที่จุดเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จากการรวมคลื่นหาได้จากการรวมการขจัดของคลื่นแต่ละขบวนตามหลักการซ้อนทับกัน (superposition) การแทรกสอดที่เกิดจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นแสงจะสังเกตเห็นได้ยากกว่าคลื่นกล เพราะความยาวคลื่นของคลื่นแสงค่อนข้างสั้น จะสังเกตเห็นการแทรกสอดของคลื่นแสงได้ง่ายก็ต่อเมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นแสงนั้นเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (coherent sources) ซึ่งจะให้กำเนิดคลื่นแต่ละขบวนเคลื่อนที่โดยมีเฟสที่ตรงกัน ให้แสงสีเดียว (monochromatic) หรือมีความยาวคลื่นค่าเดียว แหล่งกำเนิดแสงทั่วไปที่พบในชีวิตประจำวันจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ไม่ให้ความยาวคลื่นหลายค่า การแทรกสอดของคลื่นซึ่งเกิดจากการรวมคลื่นเหล่านี้ถึงแม้จะเกิดขึ้นก็ตาม การรวมคลื่นแบบเสริมกันหรือหักล้างกันจะมองเห็นได้ไม่ชัดเจน เพราะเฟสของคลื่นทั้งหลายนี้ไม่เป็นระเบียบ ผลรวมของคลื่นก็จะไม่เป็นระเบียบตามไปด้วย ผลการแทรกสอดของคลื่นที่จุด ๆ หนึ่งจะเปลี่ยนไปไม่คงที่ ถ้าเกิดขึ้นให้เห็นเป็นเวลาที่น้อยกว่า 10^{-8} วินาทีแล้ว สายตามนุษย์จะไม่สังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงนี้ได้

เราสามารถใช้นิยามศาสตร์วิเคราะห์ผลรวมของคลื่นทั้งสองขบวนได้ ให้ S_1 และ S_2 เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ มีความถี่เชิงมุม ω และแอมพลิจูดเท่ากับ A ทั้งคู่ จุด P เป็นจุดที่คลื่นพบกันอยู่ห่างจาก S_1 และ S_2 เป็น r_1 และ r_2 ตามลำดับ สมการคลื่นสำหรับ S_1 และ S_2 เขียนได้ดังนี้



รูป 7.14 คลื่นจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์ S_1 และ S_2 ทับกันที่จุด P

$$y_1 = A \sin(\omega t - kr_1) \quad \dots\dots\dots (7.14)$$

$$y_2 = A \sin(\omega t - kr_2) \quad \dots\dots\dots (7.15)$$

y_1 และ y_2 คือการขจัดของคลื่น k คือเลขคลื่นเชิงมุม (angular wave number) = $\frac{2\pi}{\lambda}$

ความต่างเฟสของคลื่นทั้งสองขบวนที่จุด P คือ

$$\delta = kr_1 - kr_2$$



$$= \frac{2\pi}{\lambda} (r_1 - r_2) \dots\dots\dots (7.16)$$

เราเรียก $(r_1 - r_2)$ ว่าเป็นผลต่างของทางเดินของแสง (path difference) เมื่อคลื่นทั้งสองขบวนรวมกัน ผลลัพธ์คือ Y เมื่อ

$$Y = y_1 + y_2$$

$$= A (\sin (\omega t - kr_1) + \sin (\omega t - kr_2))$$

อาศัยความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ

$$\sin m + \sin n = 2 \sin \left[\frac{(m+n)}{2} \right] \cos \left[\frac{(m-n)}{2} \right]$$

$$\text{จะได้ } Y = 2 A \cos \left(\frac{\delta}{2} \right) \sin \left(\omega t - \frac{(kr_1 + kr_2)}{2} \right) \dots\dots\dots (7.17)$$

แอมพลิจูดของคลื่นรวมที่จุด P คือ $2 A \cos \left(\frac{\delta}{2} \right)$ ซึ่งจะมีค่าได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึง $2A$

ถ้าเป็นการแทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference) ความเข้มของแสงจะมากที่สุด หรือแอมพลิจูดของคลื่นจะมีค่ามากที่สุด ($2A$) ซึ่งจะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ

$$\delta = 2m\pi \text{ เมื่อ } m \text{ เป็นจำนวนเต็ม } = 0, 1, 2, \dots\dots \dots (7.18)$$

ถ้าเป็นการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (destructive interference) แอมพลิจูดของคลื่นจะมีค่าต่ำสุดคือ 0 จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อ

$$\delta = (2m + 1)\pi \text{ เมื่อ } m \text{ เป็นจำนวนเต็ม } = 0, 1, 2, \dots\dots\dots (7.19)$$

เมื่อพิจารณาการแทรกสอดในรูปของผลต่างของทางเดินของแสง จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันก็ต่อเมื่อ

$$r_1 - r_2 = m\lambda \dots\dots\dots (7.20)$$

และแบบหักล้างกัน เมื่อ

$$r_1 - r_2 = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda \dots\dots\dots (7.21)$$

7.2.2 การแทรกสอดของแสงที่ผ่านช่องแคบคู่

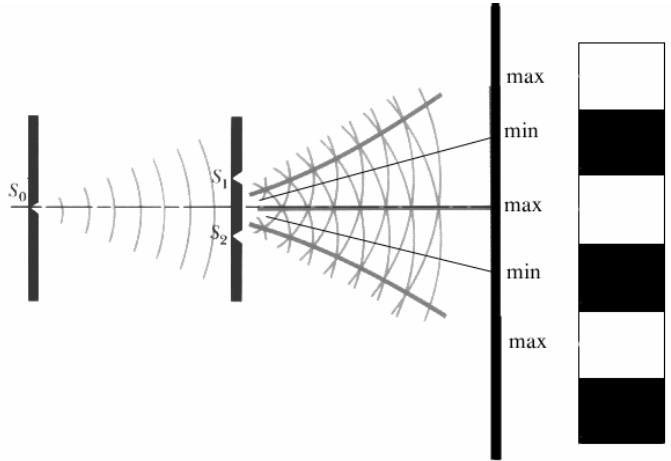
ในปี ค.ศ. 1803 โทมัส ยัง (Thomas Young) นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ทดลองให้เห็นการแทรกสอดของคลื่น โดยใช้แสงไฟจากการเผาโลหะโซเดียม แสงที่ได้จะเป็นแบบอาพันธ์ ใช้ช่องแคบเล็ก ๆ 2 ช่องซึ่งห่างกัน d (double slit) เมื่อแสงผ่านช่องแคบนี้จะทำให้เกิดหน้าคลื่นของแสงชุดใหม่ 2 ชุด ซึ่งมีเฟสเหมือนกันทุกประการ แสงทั้ง 2 ขบวนจะพบกันบนฉาก จะเกิดริ้วรอยการแทรกสอดบนฉากซึ่งเป็นแถบมืดและสว่างสลับกัน



เมื่อเขียนแผนภาพการทดลองของยัง จะได้ดังรูป 7.15

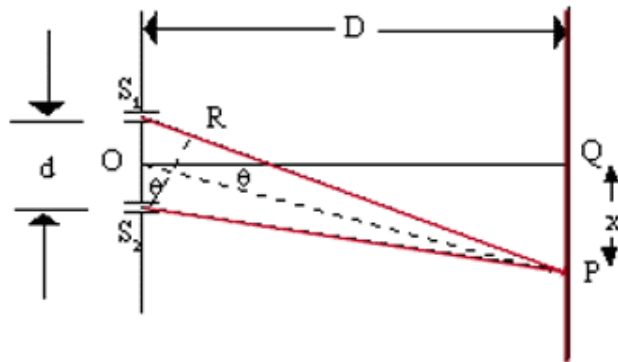
ให้ θ เป็นมุมระหว่างเส้นที่ลากจากจุด P มายังจุดกึ่งกลางของ S_1 และ S_2 กระทบกับแกน OQ แสง S_1P จะมีเส้นทางเดินยาวกว่า S_2P ผลต่างของทางเดินของแสงทั้งสองขบวนคือ

$$r_1 - r_2 = S_1R = d \sin \theta \quad \dots\dots\dots (7.22)$$



(ก) การวางช่องแคบ S_1 และ S_2

(ข) แถบมืด - สว่างบนฉาก



รูป 7.15 การแทรกสอดของแสงในการทดลองของยัง

ที่ตำแหน่ง P จะเป็นแถบสว่างหรือแถบมืด หาได้โดยใช้เงื่อนไขในสมการ (7.20) และ (7.21) จะ

เกิดแถบสว่างที่จุด P เมื่อ $d \sin \theta = m\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (7.23)$

และจะเกิดแถบมืดที่จุด P เมื่อ

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad \dots\dots\dots (7.24)$$

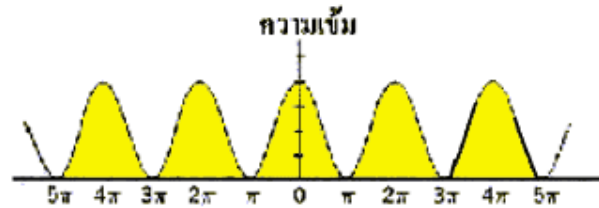
ที่จุด Q มุม $\theta = 0$ จะได้ $d \sin \theta = 0$ ไม่เกิดผลต่างของทางเดินแสงที่จุดนี้ ที่จุด Q จึงเกิดแถบสว่าง เครื่องหมายบวกและลบของ m หมายถึงแถบมืดและแถบสว่างซึ่งเกิดขึ้นทั้งสองข้างของจุด Q



เมื่อเขียนกราฟระหว่างความเข้มของแสง (I) และความต่างเฟสโดยความเข้มของแสงจะแปรผันตรงกับกำลังสองของแอมพลิจูด

$$I \propto (\text{แอมพลิจูด})^2$$

$$I \propto 4A^2 \cos^2(\delta/2)$$



m (สมการ 5.41)	2	1	0	1	2	maxima
m (สมการ 5.42)	2	1	0	0	1	2
						minima

รูป 7.16 การแจกแจงความเข้มของการแทรกสอดแบบยัง เมื่อจำนวนช่องแคบ = 2 ช่อง

ถ้า θ มีค่าน้อย ๆ $\sin \theta \cong \tan \theta \cong \frac{x}{D}$ แทนค่า $\sin \theta$ ในสมการ (7.22) จะได้

$$x_m = \frac{mD\lambda}{d} \dots\dots\dots (7.25)$$

x_m คือระยะแถบสว่างที่ m อยู่ห่างจากจุด Q

ตัวอย่าง 7.4 ในการทดลองการแทรกสอดแบบยัง ใช้ตะเกียงไอบรอทกรองแสงให้เฉพาะสีเขียวแก่ ($\lambda=5460^\circ$)

A) ผ่านช่องแคบคู่ซึ่งมีระยะห่างระหว่างช่องแคบ 0.1 มิลลิเมตร เกิดการแทรกสอดบนฉากซึ่งอยู่ห่างออกไป 20 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งเชิงมุมของค่าต่ำสุดที่ 1 และค่าสูงสุดที่ 10

วิธีทำ ก) เมื่อเกิดค่าต่ำสุดที่ 1 หรือเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกัน แถบมืดที่สุดหรือ $m = 0$

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

$$\sin \theta = \frac{\left(0 + \frac{1}{2}\right) \times 546 \times 10^{-9}}{0.1 \times 10^{-3}}$$

$$= 0.0027$$

$$\text{หรือ } \theta = 0.16 \text{ เรเดียน}$$

ข) ค่าสูงสุดที่ 10 นั่นคือ $m = 10$

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

$$\text{จะได้ } \theta = 3.8^\circ$$



ตัวอย่าง 7.5 แสงจากหลอดโซเดียมมีความยาวคลื่น 5890 แองสตรอม ผ่านช่องแคบคู่ซึ่งมีระยะห่างระหว่างช่องแคบ (a) เท่ากับ 0.02 เซนติเมตร ระยะห่างจากช่องแคบถึงฉาก (D) เท่ากับ 4 เซนติเมตร จงหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นที่แถบสว่างแถบที่ 10 เมื่อคำนวณโดยใช้ค่าประมาณที่ $D \gg a$ (1 แองสตรอม = 10^{-8} เซนติเมตร)

วิธีทำ เมื่อประมาณค่าใน $D \gg d$ มาก ๆ และ $m = 10$

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad x &= \frac{mD\lambda}{d} \\ &= \frac{10 \times 4 \times 5890 \times 10^{-8}}{0.02} \\ &= 0.11780 \text{ เซนติเมตร} \end{aligned}$$

$$\text{เมื่อคิดโดยใช้ค่าแท้จริง} \quad d \sin \theta = m\lambda$$

$$\text{แทนค่า} \quad \sin \theta = \frac{x}{\sqrt{D^2 + x^2}}$$

$$\text{จะได้} \quad x = 0.11785116 \text{ เซนติเมตร}$$

เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์

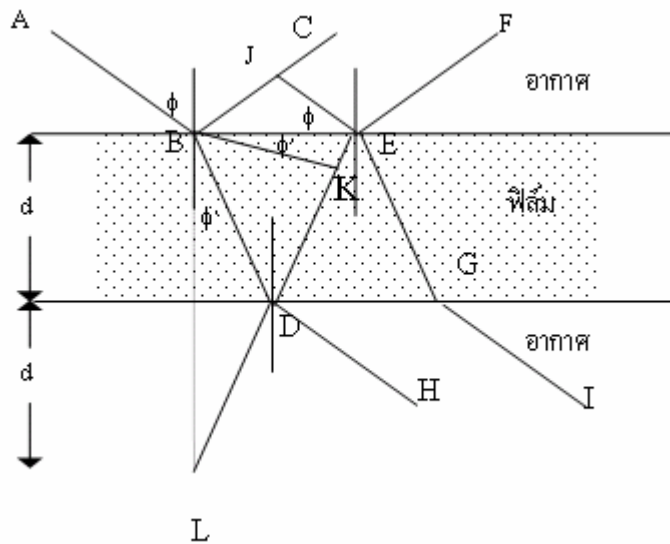
$$\begin{aligned} &= \frac{0.11785116 - 0.11780}{0.11785116} \times 100 \\ &= 0.043 \% \end{aligned}$$

การใช้ประมาณค่าเมื่อ $D \gg d$ ทำให้เกิดเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เพียง 0.043 %

7.2.3 การแทรกสอดที่เกิดจากการสะท้อนและหักเหที่ฟิล์ม

การแทรกสอดของยังเกิดจากแหล่งกำเนิดแสง 2 แหล่ง ซึ่งให้กำเนิดแสงอาพันธ์ การแทรกสอดของแสงสามารถเกิดขึ้นได้จากการตกกระทบบนตัวกลาง แล้วเกิดการสะท้อนและหักเหหลาย ๆ ครั้ง

เมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่า คลื่นที่สะท้อนจะเปลี่ยนเฟสไปเท่ากับ π ถ้าแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าไปยังตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า แสงที่สะท้อนจะไม่มีเปลี่ยนเฟส แต่แสงที่เกิดจากการหักเหจะไม่มีเปลี่ยนเฟสทั้งสองกรณี จากรูป 7.16 แสงเดินทางผ่านอากาศแล้วผ่านตัวกลางโปร่งแสง เช่น แก้ว หรือฟิล์ม แล้วหักเหผ่านอากาศอีกครั้งหนึ่ง



รูป 7.17 การแทรกสอดจากการสะท้อนและหักเหบนแผ่นฟิล์ม

AB เป็นรังสีตกกระทบ รังสีส่วนหนึ่งจะสะท้อนในแนว BC บางส่วนจะหักเหในแนว BD เมื่อตกกระทบกับผิวล่างจะสะท้อนที่ผิวล่างตามแนว DE และหักเหในแนว EF ให้ความหนาของแผ่นฟิล์ม = d , λ_n เป็นความยาวของคลื่นแสงในฟิล์ม, λ เป็นความยาวของคลื่นแสงในอากาศ n เป็นดัชนีหักเหของแผ่นฟิล์ม

รังสี ABC และ ABDEF จะมีผลต่างของทางเดินแสงไม่เท่ากัน รังสี ABC มีการสะท้อนที่จุด B เพียงครั้งเดียว ส่วนรังสี ABDEF มีการหักเหในแนว BD สะท้อนที่ผิวล่างในแนว DE และหักเหออกสู่อากาศในแนว EF ผลต่างของทางเดินแสง (Δ) โดยเริ่มวัดจากจุด B

$$\Delta = (BD + DE) - BJ$$

ดัชนีหักเหของฟิล์มคือ n หาได้จาก $\frac{\lambda}{\lambda_n}$ รังสี BD และ DE อยู่ในตัวกลาง (ฟิล์ม) อาศัย

ความสัมพันธ์ $\lambda_n = n\lambda$ เพื่อหาระยะทางที่แสงใช้เวลาเท่ากันเมื่อเดินทางในอากาศ

$$\Delta = (BD + DE) - BJ \quad \dots\dots\dots (7.26)$$

$$\begin{aligned} \text{แต่} \quad n &= \frac{\sin \phi}{\sin \phi'} \\ &= \frac{BJ / BE}{KE / BE} = \frac{BJ}{KE} \end{aligned}$$

$$\text{หรือ} \quad BJ = n(KE)$$

(เวลาที่แสงเดินทางในอากาศเท่ากับระยะ BJ เท่ากับเวลาที่แสงเดินทางในตัวกลางเท่ากับระยะ KE)

จากสมการ (7.26) แทนค่า BJ

$$\begin{aligned} \Delta &= n(BD + DE - KE) \\ &= n(BD + DK) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{แต่} \quad BD &= LD \\
 \Delta &= n(LK) \\
 \text{เพราะว่า} \quad \cos \phi' &= \frac{LK}{LB} = \frac{LK}{2d} \\
 \Delta &= 2nd \cos \phi' \quad \dots\dots\dots (7.27)
 \end{aligned}$$

เมื่อ ϕ' คือมุมหักเหของแสงในตัวกลาง (ฟิล์ม) ถ้าลำแสงตกกระทบทำให้เกิดมุมหักเหมีค่าน้อยมาก ($\cos \phi' = 1$) จะได้ผลต่างของทางเดินแสง คือ

$$\Delta = 2nd \quad \dots\dots\dots (7.28)$$

การแทรกสอดที่เกิดขึ้นที่ส่วนบนของฟิล์ม ต้องพิจารณาการกลับเฟสของคลื่นแสงที่สะท้อนด้วยเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันคือ

$$2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad \dots\dots\dots (7.29)$$

เงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันคือ

$$2nd = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad \dots\dots\dots (7.30)$$

การแทรกสอดที่เกิดขึ้นตรงส่วนล่างของฟิล์มจะเหมือนกับการแทรกสอดของยัง รังสี DH และ GI เป็นรังสีที่เกิดจากการหักเห จะมีเฟสตรงกัน รังสีที่เกิดจากการหักเหจะไม่มี การกลับเฟส

การแทรกสอดแบบเสริมกันจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2nd = m\lambda \quad \dots\dots\dots (7.31)$$

การแทรกสอดแบบหักล้างกันจะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \dots\dots\dots (7.32)$$

ถ้าแสงที่ตกกระทบฟิล์มเป็นแสงสีขาว ซึ่งมีความยาวคลื่นหลายค่า จะมองเห็นแสงที่สะท้อนและแสงที่หักเหผ่านฟิล์มมีสีต่างกัน หรือถ้าความหนาของฟิล์มไม่สม่ำเสมอ สีที่มองเห็นได้จะมีหลายสี เช่น การเกิดสีรุ้งบนฟิล์มน้ำมันที่ลอยน้ำ หรือในฟองสบู่



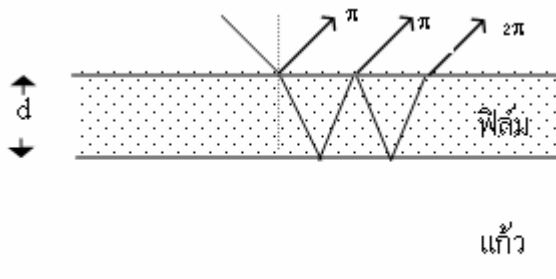
ตัวอย่าง 7.6 แสงอาทิตย์ส่องในแนวตั้งฉากกับแผ่นแก้วหนา 0.4×10^{-6} เมตร แสงสะท้อนที่เข้มที่สุดจะมีความยาวคลื่นเท่าใด (ดัชนีหักเหของแก้วเท่ากับ 1.5)

วิธีทำ แสงเดินทางจากอากาศสู่แก้ว เมื่อสะท้อนจะมีการกลับเฟส $= \pi$ การแทรกสอดจะเป็นแบบเสริมกัน แสงสะท้อนจะมีความเข้มมากที่สุด เมื่อ $m = 0$

$$\begin{aligned} 2nd &= \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \\ \lambda &= 4 \times 1.5 \times 0.4 \times 10^{-6} \\ &= 2.4 \text{ ไมโครเมตร} \end{aligned}$$

เมื่อแสงหักเหผ่านเลนส์หรือกระจกในทัศนูปกรณ์ จะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับทำให้ความเข้มของภาพลดน้อยลง แต่บางครั้งแสงที่สะท้อนกลับกลับรบกวน ทำให้ความคมของภาพลดลง เราสามารถลดปริมาณการสะท้อนของแสงที่ผิวเลนส์หรือกระจก โดยเคลือบด้วยสารโปร่งใสให้เป็นแผ่นฟิล์มบาง ๆ บนเลนส์หรือกระจกนั้น ความหนาของฟิล์มต้องพอดีทำให้แสงที่สะท้อนที่ผิวบนของฟิล์มและผิวล่างของฟิล์มแทรกสอดแบบหักล้างกัน และจะหักล้างกันอย่างสมบูรณ์เมื่อรังสีทั้งสองมีแอมพลิจูดเท่ากัน และเฟสต่างกัน π เป็นไปตามเงื่อนไข

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



รูป 7.18 การเคลือบฟิล์มป้องกันการสะท้อน

สารที่ใช้เป็นฟิล์มพบว่ามีความเหมาะสมเมื่อ

$$n_f = \sqrt{n_a n_g} \dots\dots\dots (7.33)$$

เมื่อ n_a คือดัชนีหักเหของอากาศ n_g คือดัชนีหักเหของแก้ว n_f คือดัชนีหักเหของสารที่ใช้ทำฟิล์ม โดยทั่วไปแก้วจะมีค่าดัชนีหักเหประมาณ 1.5 สารที่ใช้เคลือบจะมีค่าดัชนีหักเห 1.22 สารที่มี

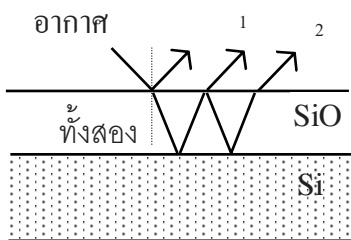


ดัชนีหักเหใกล้เคียงกับค่าดังกล่าว ได้แก่ แมกเนเซียม ฟลูออไรด์ (MgF_2) ซึ่งมีค่าดัชนีหักเห 1.38 และ ไครโอไลต์ (cryolite) มีค่าดัชนีหักเห 1.36 ความหนาที่ใช้ในการเคลือบจะอยู่ในช่วงที่ทำให้ลดการสะท้อนของแสงที่มีความยาวคลื่นตรงบริเวณกลางของสเปกตรัมที่ตามองเห็น แสงสีแดงและสีม่วงซึ่งอยู่ช่วงปลายทั้งสองของสเปกตรัมยังคงสะท้อนได้มาก ทำให้มองเห็นฟิล์มที่เคลือบมีสีม่วงออกแดง

ความยาวคลื่นในช่วงกลางของสเปกตรัมมีค่าประมาณ 550 นาโนเมตร เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันมากที่สุดที่ $m = 0$ ดัชนีหักเหของแก้วที่ใช้ทำเลนส์เท่ากับ 1.5 ใช้แมกเนเซียม ฟลูออไรด์เป็นฟิล์มเคลือบ จะต้องเคลือบให้หนาประมาณ $(1/2)(1/2)(550/1.38) = 100$ นาโนเมตร

ตัวอย่าง 7.7 เราใช้ซิลิคอนมอนอกไซด์ (SiO , $n = 1.45$) เคลือบแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ เพื่อลดความสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนของแสง เซลล์แสงอาทิตย์มีดัชนีหักเห 3.5 จงคำนวณหาความหนาดำสุดที่ทำให้แสงที่ตามองเห็นได้ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 550 นาโนเมตร มีการสะท้อนน้อยที่สุด

วิธีทำ



รูป 7.19 การลดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนบนแผ่น

เซลล์แสงอาทิตย์ โดยเคลือบด้วย SiO

รังสีที่ 1 สะท้อนที่ผิวบนของฟิล์ม

รังสีที่ 2 เกิดจากการสะท้อนที่ผิวล่าง รังสี

มีเฟสเปลี่ยนไป π การแทรกสอดหักล้าง

ทำให้ เกิดการสะท้อนต่ำสุด คือ $m = 0$

ให้ d เป็นความหนาของฟิล์ม

$$\text{จะได้ } 2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$d = \frac{\lambda}{4n} = \frac{550\text{nm}}{4 \times (1.45)}$$

$$= 94.8 \text{ นาโนเมตร}$$

ฟิล์มที่เคลือบนี้จะลดการสะท้อนแสงจาก 30% ลงเหลือเพียง 10% จะเพิ่มประสิทธิภาพของเซลล์ เพราะจะได้แสงที่มีความเข้มมากขึ้นที่จะไปกระตุ้นให้เกิดประจุอิสระ

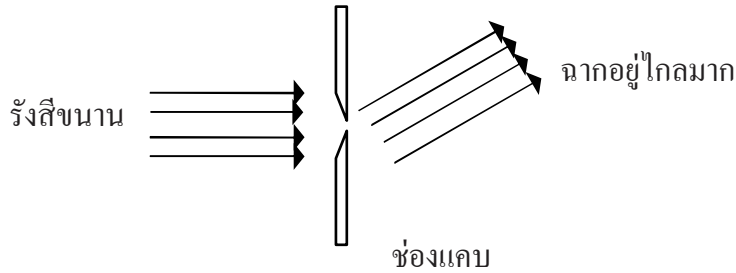
ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถเคลือบฟิล์มเพื่อลดการสะท้อนแสงที่ผิวให้เป็นศูนย์ ทั้งนี้ เพราะแสงในธรรมชาติมีความยาวคลื่นหลายค่า ความหนาของฟิล์มค่าหนึ่ง ๆ จะป้องกันการสะท้อนของแสงที่มีความยาวคลื่นบางค่าเท่านั้น

7.2.4 การเลี้ยวเบนของแสงที่ผ่านช่องแคบเดี่ยว

การเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านสิ่งกีดขวาง อาจเป็นเส้นลวดเล็ก ๆ หรือขอบกระดาษ หรือผ่านช่องแคบเล็ก ๆ การเลี้ยวเบนของแสงจะเกิดขึ้นให้เห็นอย่างชัดเจน ถ้าสิ่งกีดขวางหรือช่องแคบมีขนาดใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง

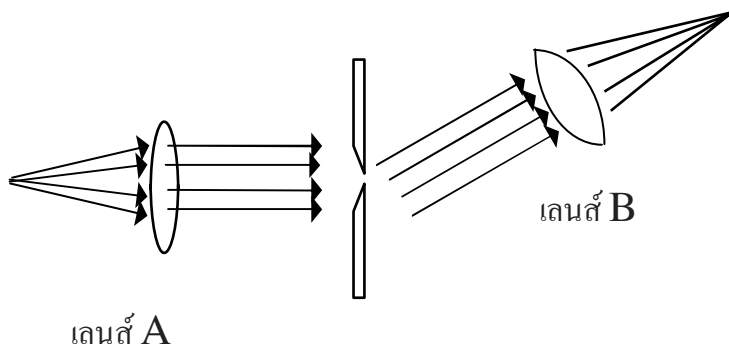


การเลี้ยวเบนของแสงแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ (Fraunhofer diffraction) รังสีที่ตกกระทบผ่านสิ่งกีดขวางเป็นเส้นขนาน หรือเป็นคลื่นระนาบ และรังสีที่เลี้ยวเบนไปตกกระทบบนฉากเป็นรังสีขนานเช่นกัน



รูป 7.20 การเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์

เราสามารถสังเกตการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ในห้องทดลองได้โดยใช้เลนส์คู่ช่วยดังรูป 7.21



รูป 7.21 การใช้เลนส์คู่ในการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์

เลนส์คู่ A ทำให้แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งมีหน้าคลื่นเป็นรูปทรงกลมเป็นแสงขนาน แหล่งกำเนิดแสงจะต้องวางอยู่ที่จุดโฟกัสของเลนส์ A เมื่อแสงเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบแสงที่ได้เป็นแสงขนาน เลนส์คู่ B จะรวมแสงขนานเหล่านี้ให้ปรากฏเป็นภาพบนฉาก ทำให้ฉากไม่ต้องอยู่ห่างจากช่องแคบมากนัก

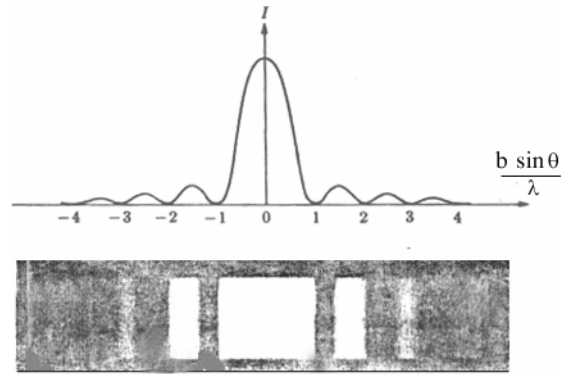
การเลี้ยวเบนอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การเลี้ยวเบนแบบเฟรสเนล (Fresnel diffraction) ต้นกำเนิดแสง สิ่งกีดขวาง และฉากอยู่ใกล้กันมาก แสงที่ได้จากแหล่งกำเนิดแสงจะมีหน้าคลื่นเป็นรูปทรงกลม

ในที่นี้จะกล่าวถึงการเลี้ยวเบนที่เกิดจากสิ่งกีดขวางที่มีรูปทรงทางเรขาคณิต หรือเกิดจากช่องแคบเล็ก ๆ รังสีตกกระทบเป็นแสงขนาน จึงเป็นการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์ การใช้รังสีที่มีหน้าคลื่นเป็นแบบทรงกลมจะต้องใช้คณิตศาสตร์ขั้นสูงในการคำนวณ

ถ้าสิ่งกีดขวางเป็นช่องแคบเดี่ยวที่มีความยาวมาก ๆ จนไม่ต้องคำนึงถึงผลที่เกิดขึ้นที่ปลายทั้งสองข้าง เมื่อแสงขนานตกกระทบช่องแคบทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่นจะเป็นแหล่งกำเนิดแสงทุติยภูมิ (secondary

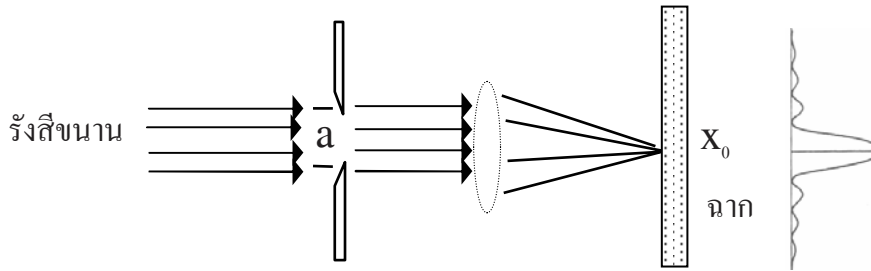


source) อีกครั้งหนึ่ง เมื่อนำเลนส์นูนบางมากมาวางข้างหลังช่องแคบ เพราะความบางของเลนส์จึงไม่มีผลกระทบต่อเฟสของคลื่นแสงแต่อย่างใด



รูป 7.22 ลวดลายการเลี้ยวเบนแบบฟรอนโฮเฟอร์

(1) เริ่มต้นพิจารณาที่จุดกึ่งกลางของฉาก คือ x_0 รังสีทุกเส้นที่ต่อออกไปจากช่องแคบไปยัง x_0 จะมีเส้นทางเดินของแสงเท่ากัน มีเฟสเหมือนกันที่ตรงช่องแคบ และที่ตรงจุด x_0 ที่จุดกึ่งกลางของแบบการเลี้ยวเบน x_0 จะมีความสว่างมากที่สุด

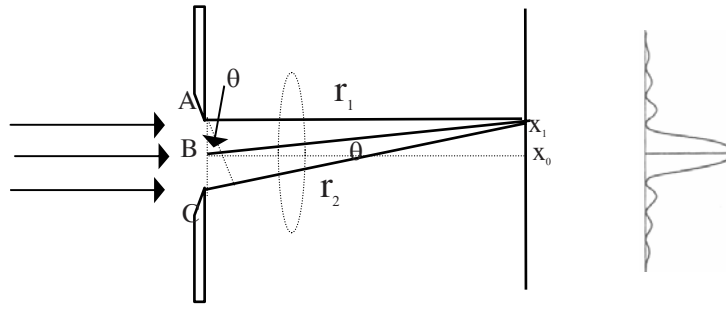


รูป 7.23 พิจารณาที่จุดกึ่งกลางของลวดลายการเลี้ยวเบน

(2) พิจารณาที่จุด x_1 โดยแบ่งช่องแคบออกเป็น 2 ส่วนเท่า ๆ กัน ที่ส่วนบนของช่องแคบจะมีรังสี r_1 ที่จุดแบ่งครึ่งจะมีรังสี r_2 กำหนดให้ระยะ BB' มีค่าเป็นครึ่งเท่าของความยาวคลื่น ทำได้โดยเลือกมุม θ นั่นคือ r_1 และ r_2 จะมีเฟสต่างกัน π เมื่อพิจารณารังสีทุกๆ เส้นจากช่องแคบส่วนบน (AB) กับรังสีทุกๆ เส้นของช่องแคบส่วนล่าง (AC) ที่สมนัยกัน (ต่างก็ห่างกันเป็นระยะ $a/2$) จะมีเฟสต่างกัน π ด้วยเสมอ จุด x_1 จึงเป็นค่าต่ำสุด ความเข้มของแสงมีค่าเป็นศูนย์ สมการที่สอดคล้องกับกรณีนี้คือ

$$\begin{aligned} \frac{a}{2} \sin \theta &= \frac{\lambda}{2} \\ a \sin \theta &= \lambda \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7.34)$$

สมการ (7.34) นี้จะได้ลวดลายการเลี้ยวเบนเป็นแถบมืด

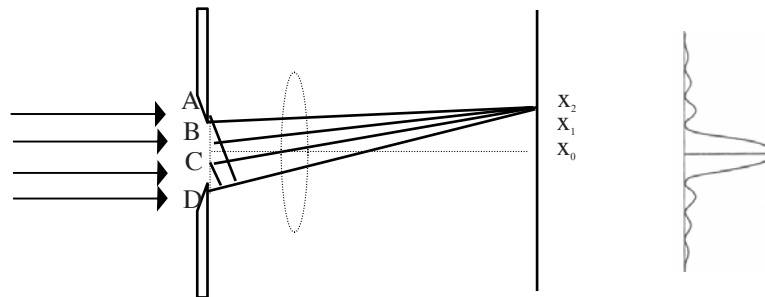


รูป 7.24 เมื่อแบ่งช่องแคบออกเป็น 2 ส่วน

(3) ถ้าแบ่ง slit ออกเป็น 3 ช่องเท่า ๆ กัน ที่จุด x_2 แสงจาก A และ B จะพบกัน แสงจาก AB (ช่องที่ 1) และแสงจาก BC (ช่องที่ 2) จะมี path different = $\frac{\lambda}{2}$ จะหักล้างกันหมดไป เหลือแต่แสงส่วน CD (ช่องที่ 3) ที่จุด x_2 จึงมีแสงสว่าง สมการที่สอดคล้องกับเงื่อนไขนี้คือ

$$\begin{aligned} \frac{a}{3} \sin \theta &= \frac{\lambda}{2} \\ a \sin \theta &= \frac{3\lambda}{2} \end{aligned} \quad \text{..... (7.35)}$$

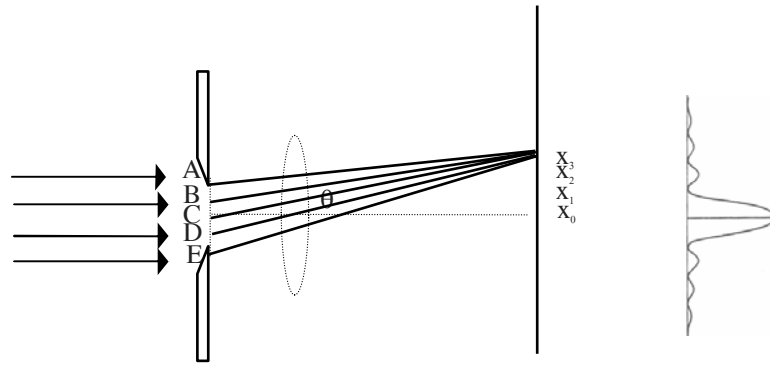
สมการ (7.35) จะเป็นแถบสว่าง



รูป 7.25 เมื่อแบ่งช่องแคบออกเป็น 3 ส่วน

(4) ถ้าแบ่ง slit ออกเป็น 4 ช่องเท่า ๆ กัน มีรังสีเลี้ยวเบนจากตอนบนของแต่ละส่วน จัตุมุม θ ให้พอดีที่ทำให้ $BB' = \frac{\lambda}{2}$ รังสี r_1 จะหักล้างกับ r_2 ที่จุด x_3 r_3 และ r_4 จะมีเฟสต่างกัน π หรือมี path different = $\frac{\lambda}{2}$ ด้วย นั่นคือที่จุด x_3 จะไม่มีแสงสว่าง จะได้ค่าต่ำสุดตำแหน่งที่ 2 นั่นคือ

$$\begin{aligned} \frac{a}{4} \sin \theta &= \frac{\lambda}{2} \\ a \sin \theta &= 2\lambda \end{aligned} \quad \text{..... (7.36)}$$



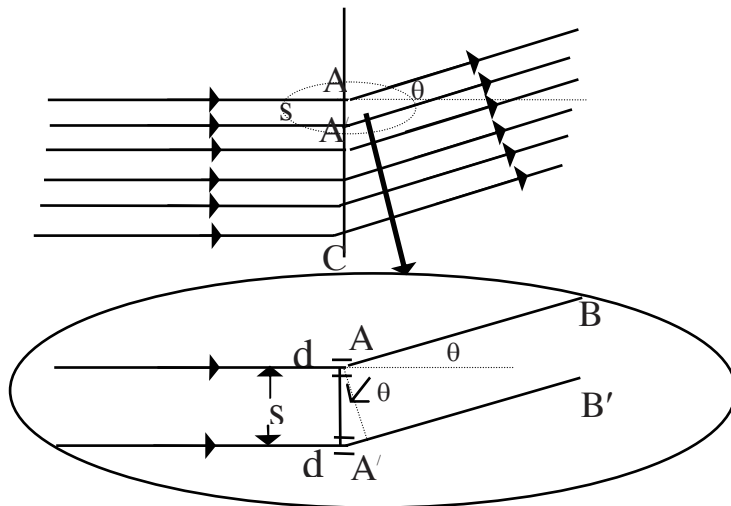
รูป 7.26 เมื่อแบ่งช่องแคบออกเป็น 4 ส่วน

(5) ถ้าแบ่งช่องแคบออกเป็น 6 ส่วน, 8 ส่วน จะได้ค่าต่ำสุดที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ค่าต่ำสุด (minima) ของการเลี้ยวเบนจึงหาได้จากสมการทั่วไป คือ

$$a \sin \theta = m\lambda \dots\dots\dots (7.37)$$

เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$

ไม่ใช่ค่า $m = 0$ เพราะค่านี้จะให้ความเข้มสูงสุดบนฉากตรงกลางของหลอดฉายการเลี้ยวเบน
ขั้นตอนต่อไปนี้จะใช้คณิตศาสตร์คำนวณหาความเข้มและเงื่อนไขการเกิดแถบมืดแถบสว่างของการเลี้ยวเบน โดยแบ่งช่องแคบออกเป็นส่วนเล็ก ๆ ความกว้างเท่ากับ s มีรังสีของแสงผ่านช่องแคบนี้ โดยมีความห่างของรังสีเท่ากับ s เช่นกัน



รูป 7.27 แสดงการแบ่งช่องแคบออกเป็นส่วนเล็ก ๆ



ตรงบริเวณที่รังสีผ่าน เช่น จุด A หรือ A' จะเป็นช่องเล็ก ๆ ขนาด ds แอมพลิจูดของคลื่นจะแปรผันตรงกับ ds ถ้า ds กว้างมากแอมพลิจูดของแสงจะมาก และถ้า ds น้อย แอมพลิจูดของคลื่นจะน้อย

คลื่นระนาบที่เวลาใด ๆ และมีเฟสเท่ากับ ϕ เขียนได้เป็น

$$y = A \sin(\omega t - \phi)$$

คลื่นที่ผ่านช่องแคบในช่วง ds เล็ก ๆ เขียนได้ใหม่ คือ

$$dy = (A ds) \sin(\omega t - \phi)$$

แอมพลิจูดของคลื่นคือ A ds แอมพลิจูดของคลื่นจะแปรผันตรงกับ ds รังสี A'B' จะลำหลังกว่ารังสี AB ผลต่างของทางเดินแสง = $s \sin \theta$

ความสัมพันธ์ของมุมเฟสและผลต่างของทางเดินแสงจากสมการ 7.16 จะได้ $\phi = \frac{2\pi s(\sin \theta)}{\lambda}$

แทนค่า ϕ จะได้

$$dy = (A ds) \sin\left(\omega t - \frac{2\pi s}{\lambda} \sin \theta\right) \dots\dots\dots (7.38)$$

การเลี้ยวเบนของแสงทั้งหมดที่ผ่านช่องแคบ AC ที่มุม θ นี้หาได้โดยการอินทิเกรตตั้งแต่ $s = 0$ ถึง $s = a$

$$\begin{aligned} y &= \int_0^a A \sin 2\pi \left(ft - \frac{s \sin \theta}{\lambda} \right) ds \\ &= \frac{A\lambda}{2\pi \sin \theta} \cos 2\pi \left(ft - \frac{s \sin \theta}{\lambda} \right) \Bigg|_0^a \end{aligned}$$

แทนค่าขีดจำกัด แล้วอาศัยความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติ

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

จะได้

$$y = \frac{A\lambda}{\pi \sin \theta} \sin\left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}\right) \sin 2\pi \left(ft - \frac{a \sin \theta}{2\lambda} \right) \dots\dots\dots (7.39)$$

ความเข้มของคลื่นแปรผันตรงกับกำลังสองของแอมพลิจูด แอมพลิจูดของคลื่นในสมการ (7.39) คือ $\frac{A\lambda}{\pi \sin \theta} \sin\left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}\right)$ ความเข้มของคลื่นคือ



$$I = \frac{\sin^2 \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}}{\left(\frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}\right)^2}$$

กำหนดให้ $B = \frac{\pi a \sin \theta}{\lambda}$

$$I = I_0 \frac{\sin^2 B}{B^2} \dots\dots\dots (7.40)$$

ลวดลายการเลี้ยวเบนจะเป็นแถบมืดเมื่อ $\sin B = 0$ นั่นคือ $B = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$

หรือเกิดแถบมืดเมื่อ

$$a \sin \theta = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

หรือ $a \sin \theta = m\lambda, m = 1, 2, 3, \dots$

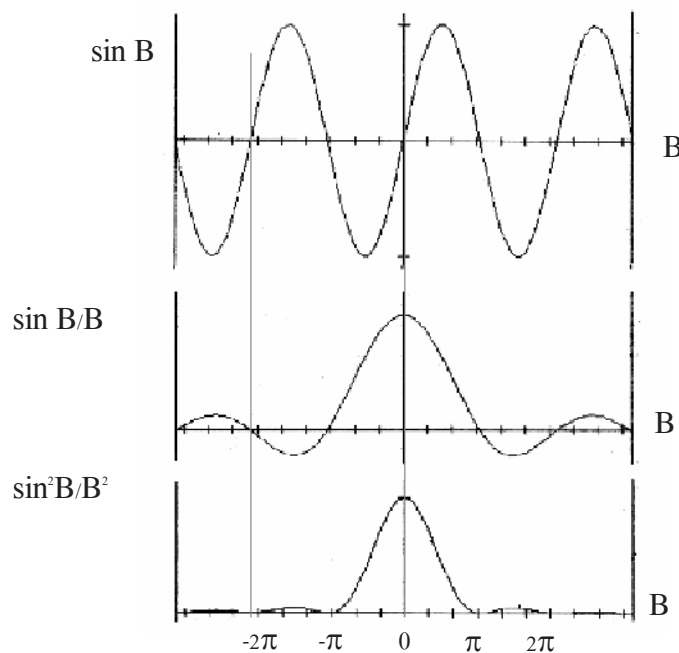
ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (7.37) ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว

สมการ (7.40) ยังคำนวณตำแหน่งของแถบสว่างได้อีกด้วย $\sin \theta = 1$ เมื่อ B มีค่าเป็นพหุนาม

ของจำนวนเต็มคี่ของ $\frac{\pi}{2}$ นั่นคือ

$$a \sin \theta = \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots$$

หรือ $a \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$ เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$



รูป 7.28 ความเข้มของแสงบนลวดลายการเลี้ยวเบน



จากรูปกราฟจะเห็นว่า ที่ $B = 0$ ความเข้มจะมีค่าสูงสุด เพราะ $\lim_{B \rightarrow 0} \frac{\sin B}{B} = 1$ ยิ่ง B มีค่ามากเท่าใด ความเข้มของแสงยิ่งน้อยลงไปเท่านั้น เช่นที่ตำแหน่ง $B = \frac{3\pi}{2}$ จะมีความเข้มเพียง $\frac{4}{9\pi^2} = 0.045$ เท่าของตำแหน่ง $B = 0$

ตัวอย่าง 7.8 แสงสีขาวยาวผ่านช่องแคบขนาด a ทำให้เกิดความเข้มค่าต่ำสุดอันดับแรกของแสงสีแดง (6500 แองสตรอม) ที่ตำแหน่งทำให้มุม $\theta = 20^\circ$ จงหาค่า a

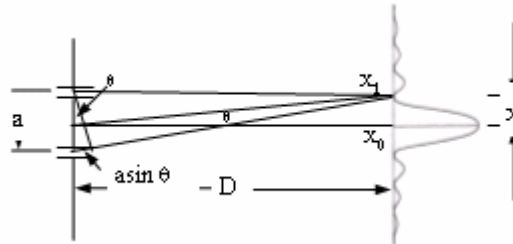
วิธีทำ จากสมการ $a \sin \theta = m\lambda$

ในที่นี้ $m = 1$, $\theta = 20^\circ$ องศา, $\lambda = 6500$ แองสตรอม

$$\begin{aligned} a &= \frac{1 \times 6500}{\sin 20} \\ &= 190,005.84 \text{ แองสตรอม} \end{aligned}$$

ประมาณ 3 เท่าของความยาวคลื่นแสงสีแดง

ให้ x เป็นระยะที่วัดจากจุดกึ่งกลางของแถบสว่างสูงสุดไปยังตำแหน่งแถบมืดตำแหน่งแรก D เป็นระยะห่างจากช่องแคบถึงฉาก



รูป 7.29 การหาความกว้างของแถบสว่างสูงสุดตรงกลาง

เมื่อ θ มีค่าน้อย ๆ $\theta \cong \sin \theta$ $x = \theta D$

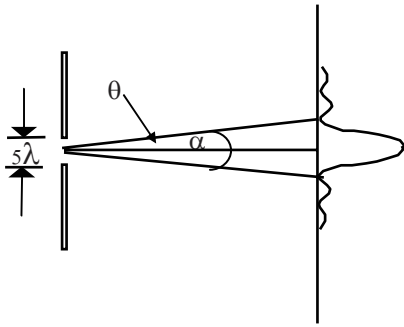
ผลต่างของทางเดินแสงตรงจุด x_1 มีค่า $a \sin \theta$ โดยที่

$$\begin{aligned} a \sin \theta &= \lambda \\ a \theta &= \lambda \\ x &= \frac{\lambda D}{a} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7.41)$$

จากสมการ (7.39) จะเห็นว่าถ้าช่องแคบมีขนาดกว้างมาก ความกว้างของแถบสว่างสูงสุดจะแคบ และถ้าช่องแคบมีขนาดเล็กหรือแคบมาก ๆ จะได้แถบสว่างสูงสุดที่ค่อนข้างกว้าง



ตัวอย่าง 7.9 แสงความยาวคลื่น λ ผ่านช่องแคบอันหนึ่งมีขนาดกว้าง $a = 5\lambda$ จงหามุมที่รองรับแถบสว่างตรงกลาง (α)



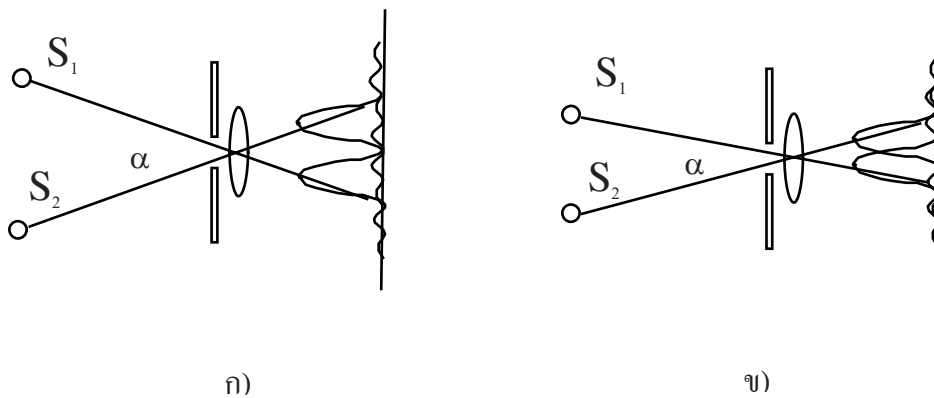
$$\begin{aligned} \text{วิธีทำ } \alpha &= 2\theta = \frac{2\lambda}{5\lambda} \\ &= 0.4 \text{ เรเดียน} \\ &= 23 \text{ องศา} \end{aligned}$$

รูป 7.30

7.2.5 กำลังแยกของทัศนูปกรณ์

ทัศนูปกรณ์ที่มีเลนส์เป็นส่วนประกอบ เช่น กล้องโทรทรรศน์ มักจะให้แสงผ่านช่องแคบเล็ก ๆ ของเลนส์ ถ้าไม่มีการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นย่อมเห็นภาพ S_1 และ S_2 แยกจากกันได้ชัดเจน แต่ถ้า S_1 และ S_2 ใกล้ชิดกันมากหรืออยู่ไกล ระยะห่างจากวัตถุถึงกล้องโทรทรรศน์ต่างกันเล็กน้อย เมื่อแสงผ่านจุดกึ่งกลางของเลนส์จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบน ภาพที่ปรากฏบนฉากจะเป็นผลรวมของการเลี้ยวเบนของแสงจาก S_1 และ S_2 ตามลำดับ

ถ้าอุปกรณ์นั้นสามารถแยกภาพออกจากกันได้ชัดเจน อุปกรณ์นั้นมีกำลังการแยกสูง มุม α (angular separation of source) เป็นตัวบอกว่าภาพทั้งสองห่างกันเท่าใด



รูป 7.31 ก) กำลังแยกสูง ภาพแยกออกจากกันได้ชัดเจน

ข) กำลังแยกต่ำ ภาพเหลื่อมซ้อนกัน



ขนาดของมุม α พอดีที่จะทำให้ค่าสูงสุดของการเลี้ยวเบนของ S_1 ตกลงบนตำแหน่งต่ำสุดที่ 1 ของการเลี้ยวเบน S_2 เรียกมุมนี้ว่าเป็นมาตรฐานของเรลีย์ (Rayleigh Criterion) ใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินว่าสามารถแยกภาพวัตถุทั้งสองออกจากกันได้หรือไม่ โดยที่

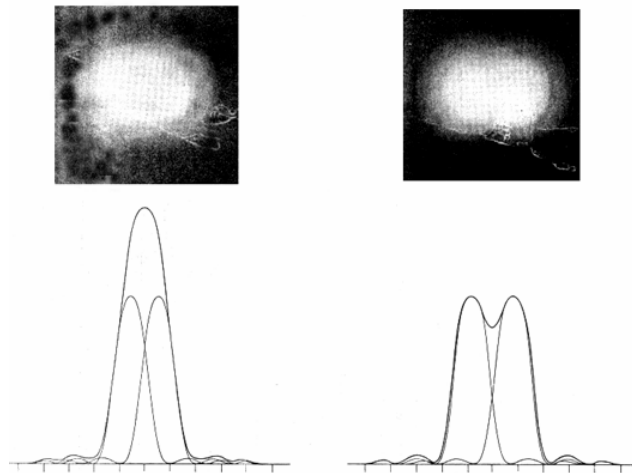
$$a \sin \alpha = \lambda$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{a} \text{ เมื่อ } \alpha \approx \sin \alpha \dots\dots\dots (7.42)$$

เมื่อช่องแคบหรือช่องที่ให้แสงผ่านเลนส์มีขนาดกว้างมาก จะได้กำลังการแยกที่ดี สมการ (7.42) ใช้กับช่องแคบที่มีลักษณะเป็นรูสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทัศนูปกรณ์มีช่องแคบเป็นรูปวงกลม ให้ D เป็นเส้นผ่าศูนย์กลางของช่องเลนส์ มุมการแยกของช่องวงกลม คือ

$$\alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D} \text{ เรเดียน } \dots\dots\dots (7.43)$$

มุมของการแยกจะโตกว่าช่องแคบรูสี่เหลี่ยมผืนผ้า



รูป 7.32 (ก) ภาพของวัตถุไม่สามารถแยกจากกัน
(ข) ภาพของวัตถุแยกจากกันได้ตามมาตรฐานเรลีย์

เมื่อวัตถุ 2 ชิ้นอยู่ไกล เช่น ดวงดาว 2 ดวง มีระยะห่างเชิงมุมน้อยมาก (α น้อยมาก) ต้องการให้ได้ภาพวัตถุแยกกันอย่างชัดเจน นั่นคือ เส้นผ่าศูนย์กลางของ slit ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อให้ภาพคมชัด (นี่คือเหตุผลว่าทำไมจึงต้องสร้างกล้องโทรทรรศน์ขนาดใหญ่) และภาพสว่างขึ้น เลนส์ที่ใหญ่จะรับแสงจากดวงดาวได้มากกว่า กล้องโทรทรรศน์ที่ใหญ่ที่สุดอยู่ที่ Yorks Observatory ประเทศสหรัฐอเมริกา เลนส์มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 40 นิ้ว แยกภาพวัตถุที่อยู่ห่างกัน 47 ฟลิปดาได้

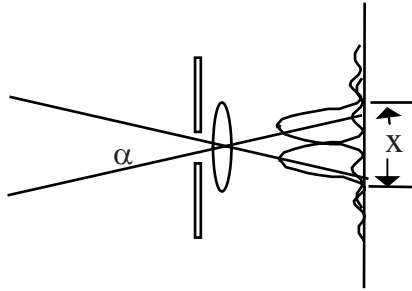
ในกล้องจุลทรรศน์ เรามักใช้แสง UV ซึ่งเป็นความยาวคลื่นสั้นเพื่อลดผลการเลี้ยวเบนได้ดีกว่าแสงที่ตามองเห็น (4000-7000 แองสตรอม) ในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะใช้ลำอิเล็กตรอน ($\lambda = 0.04 \text{ \AA}$) ทำให้สามารถแยกรายละเอียดของวัตถุเล็ก ๆ ได้ดี เช่น ไวรัส ถ้าใช้กล้องจุลทรรศน์ปกติจะไม่สามารถเห็นรายละเอียดได้ เพราะผลของการเลี้ยวเบน



ตัวอย่าง 7.10 กล้องโทรทรรศน์มีเส้นผ่าศูนย์กลางของเลนส์ 4 เซนติเมตร ความยาวโฟกัส 0.3 เมตรส่องดูดาว 2 ดวงซึ่งอยู่ใกล้กันความยาวคลื่นแสงเฉลี่ยของดวงดาวเป็นแสงสีเหลือง (5600 \AA) จงหาค่ามุมของการแยกที่น้อยที่สุดที่ทำให้แยกภาพดวงดาว 2 ดวงออกจากกันได้

จงหาจุดศูนย์กลางของการเลี้ยวเบนทั้งสองอยู่ห่างกันเท่าใด

วิธีทำ



รูป 7.33

$$\alpha = 1.22 \frac{\lambda}{D} = \frac{1.22 \times 5600 \times 10^{-10}}{4 \times 10^{-2}}$$

$$= 1.708 \times 10^{-5} \text{ rad}$$

$$= 3.52 \text{ พิลิปดา (second)}$$

ให้ α นี้พอดีกับมาตรฐานของ Rayleigh ภาพของดาวดวงที่ 1 ตกบนค่าต่ำสุดของการเลี้ยวเบนของแสงจากดาวดวงที่ 2 ดังนั้น

$$x = f\alpha = 0.3 \times 1.708 \times 10^{-5} \text{ เมตร}$$

$$= 0.5124 \times 10^{-5} \text{ เมตร}$$

7.2.6 การเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบคู่แบบพรอนโฮเฟอร์

พิจารณาช่องแคบ 2 ช่อง แต่ละช่องกว้าง a อยู่ห่างกันเป็นระยะ d เมื่อแสงผ่านช่องแคบคู่จะทำให้เกิดการเลี้ยวเบนและการแทรกสอด

ในเรื่องการแทรกสอดของยัง การคำนวณคิดว่าช่องแคบมีความกว้างน้อยมาก ($a \rightarrow 0$) ทำให้ผลต่างของทางเดินของแสงที่ผ่านช่องแคบแต่ละอันมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น จึงไม่ได้คิดถึงผลของการเลี้ยวเบน

ผลที่ได้จากการที่แสงผ่านช่องแคบคู่สามารถอธิบายได้โดยอาศัยการรวมกันของการเลี้ยวเบนที่เกิดจากช่องแคบเดี่ยว และการแทรกสอดที่เกิดจากช่องแคบคู่ของยัง

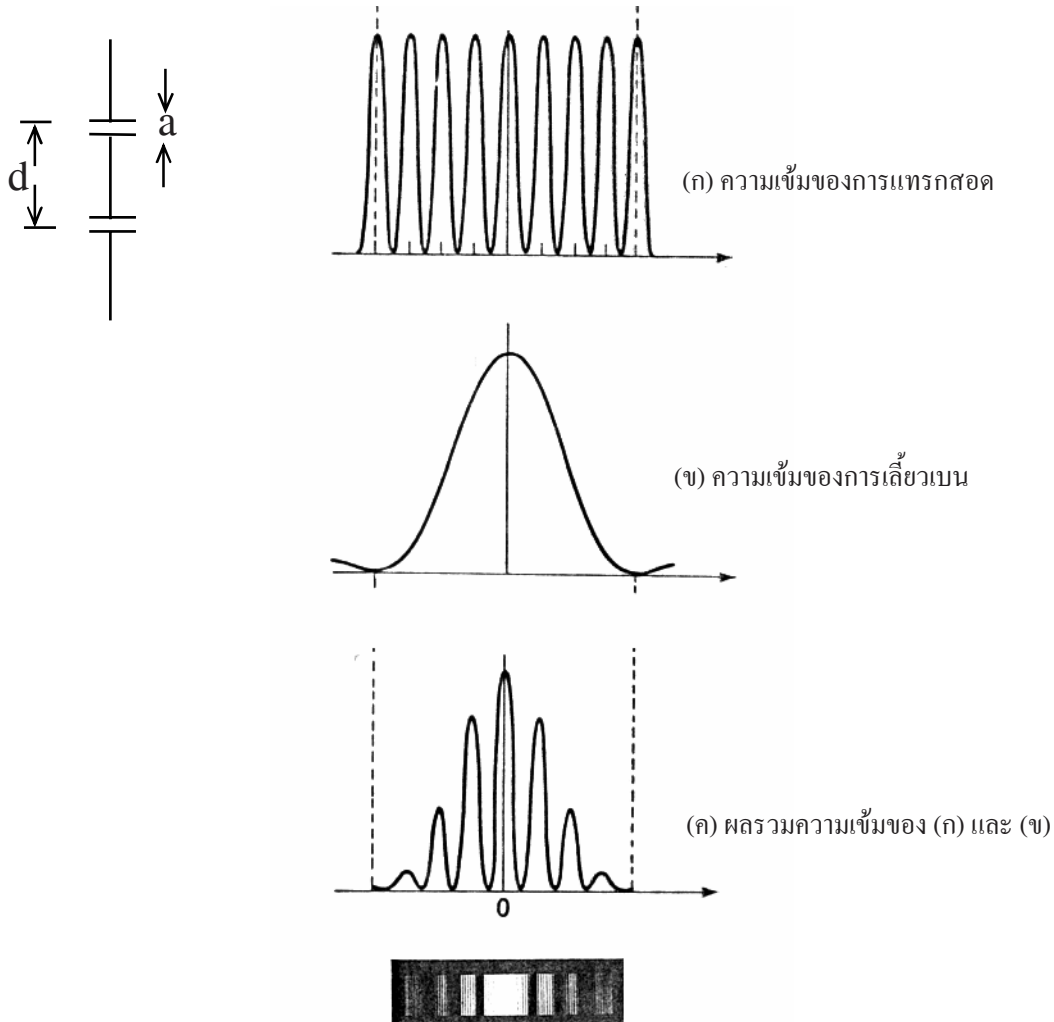
ถ้าคิดว่าขนาดช่องแคบเล็กกว่าระยะห่างระหว่างช่องแคบมากๆ การแทรกสอดที่เกิดขึ้นจะเป็นแถบมืดแถบสว่าง และจะเป็นแถบสว่างเมื่อ

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

ช่องแคบที่มีขนาดกว้าง a จะได้ลวดลายการเลี้ยวเบนบนฉาก ดังภาพ 7.32 (ข) ตำแหน่งที่เกิดแถบมืดคือ

$$a \sin \theta = n\lambda$$

เมื่อคลื่นที่เกิดจากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดทั้งสองชุดรวมกัน คลื่นทั้งสองจะเสริมกันและหักล้างกัน แถบสว่างที่เกิดจากช่องแคบคู่จะอยู่ชิดกันมากกว่าแถบสว่างที่เกิดจากช่องแคบเดี่ยว



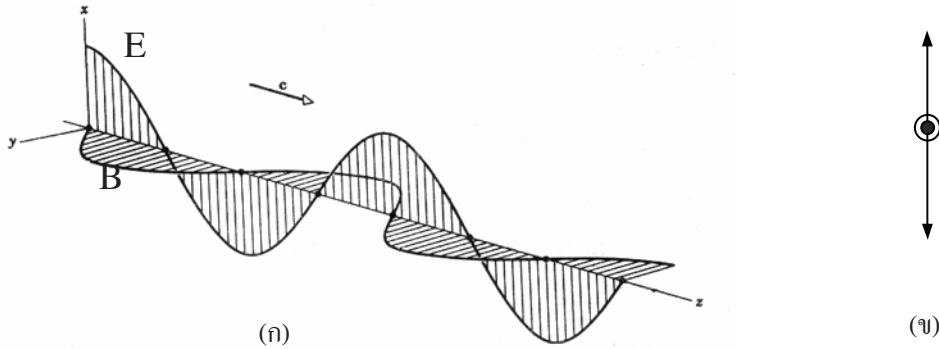
รูป 7.34 ลวดลายการเลี้ยวเบนที่เกิดจากช่องแคบคู่

7.3 โพลาริเซชัน (Polarization)

โพลาริเซชัน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับคลื่นตามขวางเท่านั้น คลื่นแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ประกอบด้วยสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก สันในแนวตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งฉากกับทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น

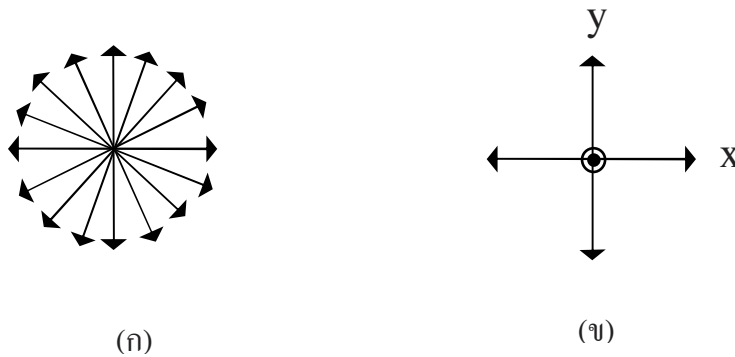
ในการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์โพลาริเซชันในที่นี่จะศึกษากรณีที่มีลักษณะเชิงเส้น คลื่นแสงเป็นคลื่นระนาบ สนามไฟฟ้ามีการสั่นที่ขนานกันเสมอไม่ว่าจะอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ เราสนใจทิศทางการสั่นของสนามไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว ซึ่งอันที่จริงแล้วมีทิศทางการสั่นของสนามแม่เหล็กด้วย

รูป 7.33 ทิศของสนามไฟฟ้าจะสั่นในแนว $\pm y$ ระนาบที่ประกอบด้วยทิศการสั่นของ E และทิศการเคลื่อนที่ของคลื่นเรียกว่า ระนาบของโพลาริเซชัน (plane of polarization) จากรูปคือระนาบ yz



รูป 7.35 คลื่นแสงมีลักษณะโพลาไรซ์ เคลื่อนที่ไปในทิศ $+z$ เขียนเป็นสัญลักษณ์ดังในรูป (ข)

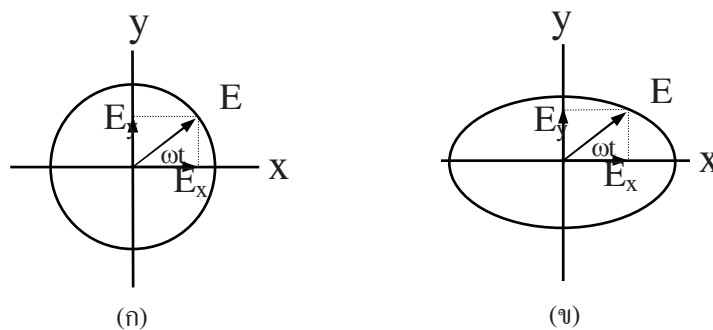
แสงในธรรมชาติ, แสงจากหลอดไฟเป็นแสงไม่โพลาไรซ์ จะมี สนามไฟฟ้าสั่นในหลายทิศทาง ดังรูป 7.34(ก) เราอาจแทนแสงไม่โพลาไรซ์ด้วยสนามไฟฟ้าสั่นในแนวแกน x และ y ดังรูป 7.34 (ข) ผลต่างเฟสของสนามไฟฟ้ามีค่าไม่คงที่



รูป 7.36 (ก) แสงไม่โพลาไรซ์ ประกอบด้วยแสงโพลาไรซ์จำนวนมาก

(ข) แสงโพลาไรซ์ 2 ชุดที่มีผลต่างของเฟสไม่คงที่

แสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่มีสนามไฟฟ้าสั่นในทิศขนานกัน บางครั้งสามารถแตก \vec{E} ให้อยู่ในแนวแกน x และ y โดยมีผลต่างของเฟสต่างกัน



รูป 7.37 ทิศการเคลื่อนที่ของแสงพุ่งออกจากกระดาษ ทิศของ

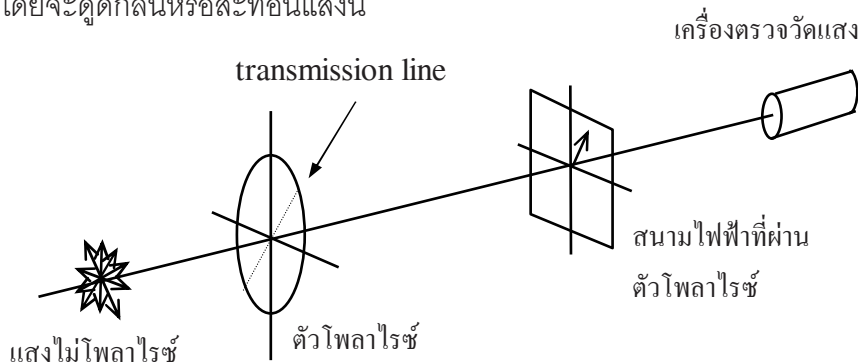


ถ้าการสั่นของ E ทำให้ผลรวมของ E_x และ E_y มีค่าคงที่ เรียกว่าเป็นแสงโพลาไรซ์แบบวงกลม (circular polarized light) ทิศทางการหมุนของเวกเตอร์ E จะหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมคงที่ แสงโพลาไรซ์แบบวงรี (elliptically polarized light) จะคล้ายกับแบบวงกลม ต่างกันตรงที่ผลรวมของ E มีค่าไม่คงที่ ถ้าพูดถึงแสงโพลาไรซ์ นั้นอาจหมายถึงแสงโพลาไรซ์แบบระนาบ (plane) แบบวงกลม หรือแบบวงรีก็ได้ แต่โดยทั่วไปถ้าไม่ระบุแล้วจะหมายถึงแสงโพลาไรซ์แบบระนาบ

7.3.1 กฎของมาลัส (Malus' law)

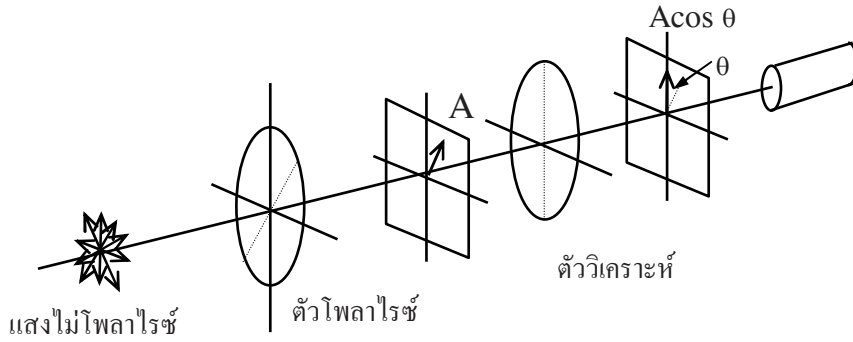
แสงที่ไม่โพลาไรซ์สามารถทำให้เป็นแสงโพลาไรซ์ได้ โดยใช้ตัวโพลาไรซ์ (polarizer) ตัวโพลาไรซ์ที่รู้จักกันดี ได้แก่ ฟิล์มโพลาไรซ์ที่ใช้ทำแว่นกันแดด ตัวโพลาไรซ์เป็นอุปกรณ์จะยอมให้แสงผ่านตัวมันถ้าระนาบของโพลาไรเซชันของแสงขนานกับแกนการส่องผ่าน (transmission axis)

ถ้าระนาบของโพลาไรเซชันตั้งฉากกับแกนการส่องผ่าน แสงในแนวนี้จะถูกกั้นไม่ให้ผ่านตัวโพลาไรซ์ โดยจะดูดกลืนหรือสะท้อนแสงนี้



รูป 7.38 ตัวโพลาไรซ์จะยอมให้แสงในระนาบที่ขนานกับแกนการส่องผ่านของตัวโพลาไรซ์

ถ้าให้แสงที่ผ่านตัวโพลาไรซ์ ซึ่งกลายเป็นแสงโพลาไรซ์นี้ผ่านตัวโพลาไรซ์ตัวที่สอง โดยทั่วไปจะเรียกว่า ตัววิเคราะห์ (Analyzer) ให้ θ เป็นมุมของแกนการส่องผ่านของตัวโพลาไรซ์ทั้งสองทำมุมกัน แสงโพลาไรซ์มีแอมพลิจูด A เมื่อผ่านตัววิเคราะห์ซึ่งแกนของตัววิเคราะห์ทำมุม θ กับตัวโพลาไรซ์ แสงที่จะผ่านตัววิเคราะห์ไปได้คือ แสงที่มีแอมพลิจูด $A \cos\theta$



รูป 7.39 เมื่อนำตัววิเคราะห์วางให้แสงโพลาไรซ์ผ่านแสงที่มีแอมพลิจูด $A \cos \theta$

เนื่องจากความเข้มของแสงแปรผันกับกำลังสองของแอมพลิจูด

ให้ I_0 เป็นความเข้มของแสงเมื่อผ่านตัวโพลาไรซ์ โดยที่ $I_0 \propto (A)^2$

I เป็นความเข้มของแสงเมื่อผ่านตัววิเคราะห์แล้ว

$$I \propto (A \cos \theta)^2$$

ค่าคงที่ของการแปรผันจะคงที่ ดังนั้น

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad \dots\dots\dots (7.44)$$

เรียกสมการ (5.62) ว่าเป็นกฎของมาลัส (Malus' law) เป็นสมการที่ใช้คำนวณหาความเข้มของแสงที่ผ่านไปได้ ซึ่งปริมาณความเข้มของแสงจะแปรผันตรงกับกำลังสองของโคไซน์ของมุมระหว่างตัวโพลาไรซ์ทั้งสอง

ความเข้มของแสงที่ผ่านตัววิเคราะห์จะมีค่าต่ำสุดเมื่อแกนการส่งผ่านของตัววิเคราะห์ทั้งสองตั้งฉากกัน และจะมีความเข้มสูงสุดเมื่อ $\theta = 0$ หรือ π เมื่อหมุนตัววิเคราะห์ความเข้มของแสงที่ผ่านจะมีค่าอยู่ระหว่างศูนย์ถึง I_0 การหมุนตัววิเคราะห์จะใช้ในการตรวจสอบว่าแสงนั้นเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือไม่ แสงไม่โพลาไรซ์หรือแสงที่โพลาไรซ์เพียงบางส่วน ความเข้มของมันจะไม่เป็นไปตามกฎนี้

ตัวโพลาไรซ์และตัววิเคราะห์ที่กล่าวถึงในกฎมาลัส เราถือว่าเป็นตัวโพลาไรซ์แบบอุดมคติ คือจะยอมให้แสงที่ขนานกับแกนการส่งผ่านของตัวโพลาไรซ์เท่านั้น ตัวโพลาไรซ์ในความเป็นจริงนั้นมิได้ทำให้แสงไม่โพลาไรซ์กลายเป็นแสงโพลาไรซ์ได้สมบูรณ์ ปริมาณที่ใช้บอกความสามารถของตัวโพลาไรซ์ เรียกว่า องศาของการโพลาไรซ์ (degree of polarization, P) หาได้จาก

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%$$

ถ้าแสงที่ตกกระทบที่ตัววิเคราะห์เป็นแสงไม่โพลาไรซ์ ความเข้มของแสงต่ำสุดจะเท่ากับความเข้มแสงสูงสุด จะได้ $P = 0$ เมื่อ $P = 100\%$ แสงที่ผ่านตัววิเคราะห์จะเป็นแสงโพลาไรซ์เชิงเส้นที่สมบูรณ์



ตัวอย่าง 7.11 จากการตรวจสอบของเสาของการโพลาไรซ์ของตัวโพลาไรซ์อันหนึ่ง พบว่าความเข้มของแสงเมื่อ
 แขนการส่งผ่านของตัวโพลาไรซ์และแกนการส่งผ่านของตัววิเคราะห์ขนานกัน มีค่า I_m ความเข้มเมื่อแกนทั้ง
 สองตั้งฉากมีค่า $0.127I_m$ ถ้าตัววิเคราะห์มีคุณสมบัติตัวโพลาไรซ์แบบอุดมคติ จงคำนวณองศาของการ
 โพลาไรซ์ของตัวโพลาไรซ์นี้

วิธีทำ

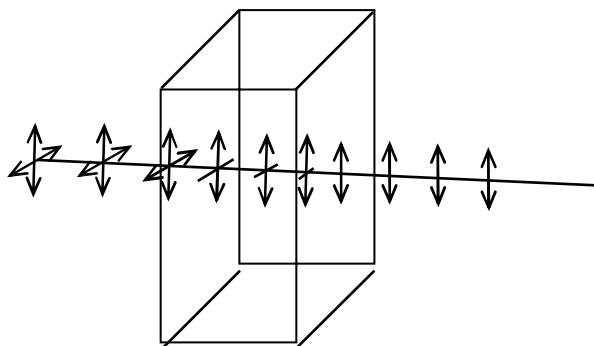
$$P = \frac{I_m - 0.127I_m}{I_m + 0.127I_m}$$

$$= \frac{0.873}{1.127} = 0.775$$

แสงที่ผ่านตัวโพลาไรซ์จะเป็นแสงโพลาไรซ์เพียง 77.5%

7.3.2 การทำให้แสงเกิดการโพลาไรซ์

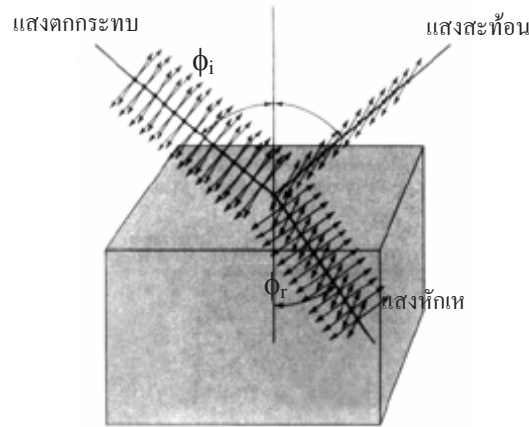
วิธีการไดโครอิก (Dichroism) เป็นวิธีที่ทำให้แสงเกิดการโพลาไรซ์ ใช้วัสดุบางชนิดมาดูดกลืน
 องค์ประกอบของแสงในแนวอื่น ๆ ให้เหลือเฉพาะองค์ประกอบในแกนที่ต้องการเท่านั้น ผลึกไดโครอิกที่รู้จัก
 กันทั่วไป ได้แก่ ผลึกทัวร์มาลีน (tourmaline) มีโครงสร้างทางเคมีหลายแบบ แต่ละแบบจะมีแกนการส่งผ่าน
 โดยเฉพาะ ถ้าสนามไฟฟ้าตกกระทบในแนวตั้งฉากกับแกนนี้จะถูกดูดกลืนไว้หมด ถ้าผลึกยังหนากการ
 ดูดกลืนจะสมบูรณ์มากขึ้น ผลึกทัวร์มาลีนมีข้อจำกัดตรงที่มีขนาดเล็ก และมีสีคล้ำจึงไม่นิยมใช้ในทัศนูปกรณ์
 ต่อมาได้มีการสร้างผลึกจากสารประกอบอินทรีย์ไอโอโดซัลเฟตของควินิน ซึ่งปัจจุบันเรียกว่า เฮอราพาไธต์
 (herapathite) ตามชื่อผู้ประดิษฐ์คือเฮอราพาธ (Herapath) มีสมบัติเหมือนผลึกทัวร์มาลีน แต่ใสกว่า ต่อมาได้
 มีการนำผลึกเฮอราพาไธต์ไปทำเป็นแผ่นโพลาไรซ์ เรียกชื่อทางการค้าว่า โพลารอยด์ ซึ่งนำไปทำแว่นตา
 กันแดด ซึ่งจะเป็นเสมือนตัววิเคราะห์ โดยจะให้แสงที่มีสนามไฟฟ้าในแนวตั้งเท่านั้นผ่านไปได้ ซึ่งสามารถตัด
 แสงไปได้ถึง 50%



รูป 7.40 แสงไม่โพลาไรซ์เปลี่ยนเป็นแสงโพลาไรซ์เมื่อผ่านตัวโพลาไรซ์



เมื่อให้แสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบบนตัวกลางผิวเรียบ เช่น ผิวน้ำ หรือผิวแก้วโดยคิดว่าแสงไม่โพลาไรซ์ประกอบด้วยสนามไฟฟ้า 2 แขน ซึ่งตั้งฉากกัน แขนหนึ่งตั้งฉากกับระนาบของแสงตกกระทบบมีทิศพุ่งออกจากหน้ากระดาษ ส่วนอีกแขนหนึ่งขนานกับระนาบของแสงตกกระทบบ มีทิศตามลูกศร ดังรูป 7.41



รูป 7.41 แสงโพลาไรซ์ที่เกิดจากการสะท้อน

เมื่อเปลี่ยนค่ามุมตกกระทบบ ϕ_i ต่างๆ กัน แสงที่สะท้อนจะประกอบด้วยองค์ประกอบของสนามไฟฟ้าทั้งสองแกน แต่สนามไฟฟ้าที่มีทิศพุ่งออกจากกระดาษจะสะท้อนได้ดีกว่า สนามไฟฟ้าในแกนนี้จึงมีมากกว่าสนามไฟฟ้าในแนวขนานกับระนาบของการสะท้อน เราเรียกแสงสะท้อนนี้ว่าเป็นแสงโพลาไรซ์บางส่วน (partially polarize) ถ้าเปลี่ยนมุม ϕ_i ไปเรื่อยๆ จะมีมุมตกกระทบบมุมหนึ่งซึ่งจะทำให้แสงที่สะท้อนเหลือแต่สนามไฟฟ้าที่พุ่งออกจากกระดาษเพียงแกนเดียว ซึ่งจะเป็นแสงโพลาไรซ์บริสุทธิ์ เราเรียกมุมตกกระทบบ (ϕ_p) นี้ว่า มุมโพลาไรซ์ หรือมุมบรูว์สเตอร์ (Brewster angle) ใช้สัญลักษณ์ว่า ϕ_p เมื่อเกิดกรณีเช่นนี้พบว่า แสงสะท้อนกับแสงหักเหจะตั้งฉากกันพอดี

$$\text{นั่นคือ } \phi_p + \phi_r = 90^\circ$$

ซจากกฎของสเนล

$$n_1 \sin \phi_p = n_2 \sin \phi_r$$

สามารถนำไปสู่

$$\tan \phi_p = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots (7.45)$$

ถ้าตัวกลางที่ 1 เป็นอากาศ $n_1 = 1$ จะได้ $\tan \phi_p = n_2$ สมการ (7.45) เรียกว่า กฎของบรูว์สเตอร์ เมื่อแสงไม่โพลาไรซ์เดินทางจากอากาศตกกระทบบผิวแก้ว แสงสะท้อนจะเป็นแสงโพลาไรซ์เมื่อ $\phi_p = 56$ องศา ถ้าตัวกลางที่ตกกระทบบเป็นผิวน้ำ จะได้มุมบรูว์สเตอร์เท่ากับ 53 องศา



ตัวอย่าง 7.12 เมื่อให้แสงตกกระทบบนผิวเรียบของสารไดอิเล็กตริกชนิดหนึ่ง แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์ เมื่อมุมตกกระทบเท่ากับ 58 องศา จงหาดัชนีหักเหของสารนี้

วิธีทำ จากกฎของบรูสเตอร์

$$\begin{aligned}\tan 58^\circ &= n \\ n &= 1.6\end{aligned}$$

เรานำการโพลาไรซ์ของแสงไปใช้ประโยชน์ในงานตรวจสอบชิ้นวัสดุ เช่น แก้ว หรือพลาสติกใส โดยปกติวัสดุเหล่านี้จะมีการจัดเรียงของโมเลกุลเป็นแบบสมมาตร แต่ถ้าถูกแรงกระทำหรือมีความเครียดซึ่งเกิดจากการหล่อที่ไม่ถูกต้อง จะทำให้วัสดุเหล่านี้มีลักษณะไม่สมมาตร เกิดแกนส่งผ่านอยู่ในทิศที่แรงกระทำ เมื่อนำไปส่องดูระหว่างแหล่งกำเนิดแสงโพลาไรซ์ และตัววิเคราะห์จะปรากฏเป็นริ้วรอย ซึ่งริ้วรอยเหล่านี้ทำให้รู้ว่าส่วนไหนของวัสดุได้รับแรงมากน้อยเพียงใด หรือแก้วมีรอยร้าวไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ทำเป็นทัศนอุปกรณ์

ผลึกบางชนิดพบว่าเมื่อฉายแสงโพลาไรซ์ผ่านเข้าไป ระนาบของโพลาไรซ์จะบิดไปอย่างสม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับระยะทางที่แสงเคลื่อนที่ และความยาวคลื่นของแสง เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเป็นกิจกรรมทัศน (Optical activity) เรานำความรู้นี้ไปสร้างเครื่องมือที่วัดการบิดของระนาบของแสงโพลาไรซ์ของสารละลาย เรียกว่า โพลาริมิเตอร์ (polarimeter) มุมที่บิดไปของตัววิเคราะห์ในโพลาริมิเตอร์จะขึ้นกับความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อทราบค่ามุมที่บิดไปของตัววิเคราะห์ เราจึงคำนวณหาความเข้มข้นของสารละลายนั้นได้



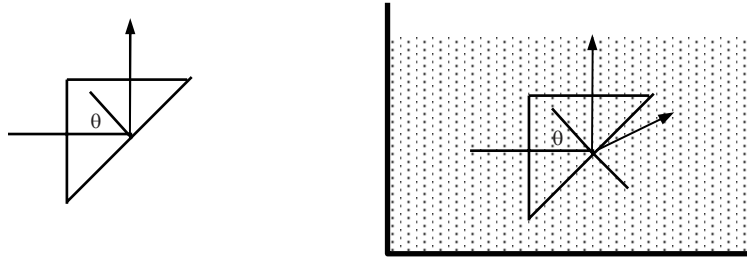
แบบฝึกหัดหน่วยที่ 7 ทัศนศาสตร์

- 7.1 สารโปร่งแสงชนิดหนึ่งเมื่อให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านความถี่แสงผ่านพบว่า มีค่าสภาพ ซาบซีมีได้ทางแม่เหล็กสัมพัทธ์ (relative magnetic permeability) เท่ากับ 1 มีค่าคงที่ ไดอิเล็กตริกเท่ากับ 2.25
- จงหาความเร็วของแสงในตัวกลางนี้ $(2 \times 10^8 \text{ เมตร/วินาที})$
 - ดัชนีหักเหของสารนี้ (1.5)
- 7.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอวกาศพบว่ามีค่าสนามไฟฟ้าค่าสูงสุดเท่ากับ 500 โวลต์/เมตร จงหาค่า สนามแม่เหล็กสูงสุดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดนี้ $(1.667 \times 10^{-6} \text{ เทสลา})$
- 7.3 ชายคนหนึ่งสูง 170 เซนติเมตร ต้องการซื้อกระจกเงาที่มีขนาดพอที่จะมองดูตนเองได้ตั้งแต่หัวจรดเท้าตาของเขาอยู่สูงจากพื้น 160 เซนติเมตร
- ถ้าเขายืนห่างกระจก 1 เมตร กระจกต้องมีขนาดเท่าใด และแขวนสูงจากพื้นเท่าใด
 - ถ้าเขายืนห่างกระจก 2 เมตร กระจกต้องมีขนาดเท่าใด และแขวนสูงจากพื้นเท่าใด
- 7.4 จงเขียนแผนภาพเพื่อแสดงการเกิดภาพ เมื่อวางวัตถุไว้หน้ากระจกเว้าและกระจกนูนที่ระยะต่าง ๆ กัน
- 7.5 กระจกเงาระนาบ 2 บาน วางทำมุมเป็น ก. 45 องศา ข. 60 องศา ค. 120 องศา วัตถุวางบนเส้นแบ่งครึ่งมุมระหว่างกระจกเสมอ จงหาจำนวนภาพที่เกิดขึ้น $(7, 5, 2 \text{ โดยใช้สูตร จำนวนภาพ} = 360/\text{angle}-1)$
- 7.6 วัตถุอยู่ห่างจากกระจกเว้า 5 เมตร กระจกมีรัศมีความโค้ง 8 เมตร ที่ระยะห่างจากจุดยอด 10 เมตร มีกระจกระนาบวางอยู่
- จงหาตำแหน่งภาพของวัตถุจริง และภาพที่เกิดการสะท้อนในกระจกเงา
 - ภาพของแต่ละภาพเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน



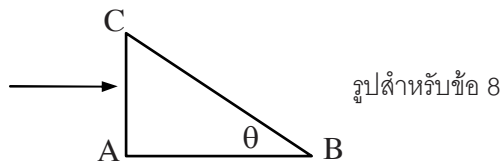
7.7 การสะท้อนกลับหมด (total Internal Reflection) เป็นปรากฏการณ์ที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย มุมตกกระทบมีค่ามากกว่า มุมวิกฤตตั้งรูป เมื่อแสงตกกระทบตั้งฉากกับด้านหนึ่งของปริซึมแล้วสะท้อนกลับหมดที่ผิวด้านหนึ่งให้ $\theta = 45$ องศา จงหาดัชนีหักเหของแก้วที่ใช้ทำปริซึมถ้าปริซึมดังกล่าวไปจุ่มในน้ำ ($n = 1.33$) จะเกิดปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดหรือไม่

(มุมวิกฤตของแก้วกับน้ำคือ 70.6 องศา, เกิดการหักเหสู่ผิวน้ำ มุมหักเห = 48.56 องศา) (1.41)



รูปสำหรับข้อ 7

7.8 ปริซึมแก้วมีค่าดัชนีหักเห 1.52 จงหาค่า θ ใหญ่ที่สุด ที่ทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดที่ด้าน BC (46 องศา)



7.9 ตารางต่อไปนี้ แสดงสมบัติบางอย่างของกระจกโค้งทรงกลม 8 ชั้น ให้เติมข้อมูลที่ขาดหายไปให้ครบ ตัวเลขที่ไม่มีเครื่องหมายนำหน้าอาจเป็นบวกหรือลบ หน่วยวัดเป็นเซนติเมตร

ชั้นที่	1	2	3	4	5	6	7	8
ชนิดแรก	เว้า						นูน	
ความยาว f	20		+20			20		
รัศมีความโค้ง					-40		40	
ระยะภาพ					-10		4	
ระยะวัตถุ	+10	+10	+30	+60				+24
กำลังขยาย		+1		-0.5				0.5
ชนิดภาพ		เสมือน						จริง

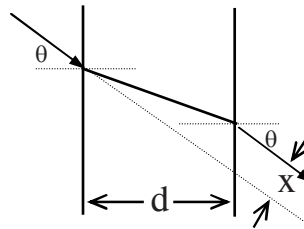


- | | |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1) +, +40, -20, +2, เสมือน | 2) ระบาย, อนันต์, อนันต์ -10 |
| 3) เว้า, +40, +60, -2 จริง | 4) เว้า, +20, +40, +30, จริง |
| 5) นูน, -20, +20, 0.5, เสมือน | 6) นูน, -, -40, -18, +180, เสมือน |
| 7) -20, -, -, +5, +0.8, เสมือน | 8) เว้า, +8, +16, +12, -] |

7.10 การถ่ายภาพดวงจันทร์ผ่านกล้องโทรทรรศน์ โดยนำฟิล์มไปวางไว้ที่จุดโฟกัสของกระจกเว้า ซึ่งมีความยาวโฟกัส 2 เมตร เกิดภาพจริงของดวงจันทร์บนฟิล์ม ถ้าดวงจันทร์มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3,480 กิโลเมตร อยู่ห่างจากโลก 386,000 กิโลเมตร ภาพดวงจันทร์มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่าใด

7.11 แสงตกกระทบบนแผ่นแก้วหนา d แสงที่ผ่านออกมาอีกด้านหนึ่งจะขนานกับทิศทางเดิม แต่ จะเลื่อนออกไปจากแนวเดิมเล็กน้อย ถ้า θ เป็นมุมเล็กมากมีหน่วยเป็นเรเดียน และ n คือ ดัชนีหักเหของแก้ว ส่วนที่เลื่อนจากแนวเดิม (x) คือ $x = \theta d \frac{(n-1)}{n}$

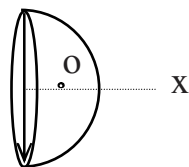
รูปสำหรับข้อ 11



7.12 เลนส์เว้ามีรัศมีความโค้งเท่ากันทั้ง 2 ด้าน ทำจากแก้วควอทซ์ มีดัชนีหักเห 1.65 จงหารัศมี ความโค้งของเลนส์ ถ้ากำลังของเลนส์มีค่า -2.5 ไดออปเตอร์ (0.52 เมตร)

7.13 เลนส์ 2 ชิ้นมีความยาวโฟกัส +8 เซนติเมตร และ -12 เซนติเมตร วางห่างกัน 6 เซนติเมตร วัตถุ สูง 3 เซนติเมตร วางห่างจากเลนส์ชิ้นแรก 24 เซนติเมตร จงหาขนาดและตำแหน่งที่เกิดภาพ (+3 เซนติเมตร, 12 เซนติเมตร)

7.14 พลาสติกรูปครึ่งวงกลมรัศมีความโค้ง 8 เซนติเมตร ดัชนีหักเหเท่ากับ 1.6 รอยตำหนิของ



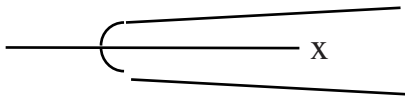
พลาสติกอยู่ตรงจุด O ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางของรัศมีพอดี เมื่อมองดูในแนวแกน x จะมองเห็นรอยตำหนินี้ที่อยู่ห่างจากผิวพลาสติกเท่าใด

รูปสำหรับข้อ 14

(-3.25 เซนติเมตร)



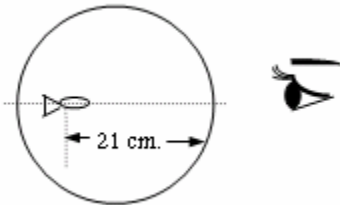
- 7.15 พลาสติกถูกหล่อให้เป็นแท่งดังรูป มีรัศมีความโค้ง R ดัชนีหักเห 1.42 เมื่อลำแสงผ่านเข้าไปในแท่งจากทางซ้ายมือ แสงจะไปรวมกันตรงตำแหน่งที่ห่างจากผิวโค้งโดยวัดไปตามแนวแกนของแท่งที่ระยะใด



รูปสำหรับข้อ 15

(3.38 R)

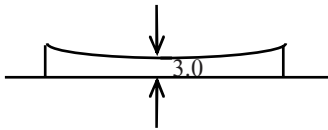
- 7.16 ทรงกลมใสน้ำจืดมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร ถ้าคิดว่าแก้วบางมากจนไม่ต้องคิดการหักเหที่ผิวแก้ว ปลาตัวหนึ่งอยู่ห่างจากผิว



รูปสำหรับข้อ 7.16

แก้ว 7 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งที่มองเห็นปลา (-25.2 เซนติเมตร)

- 7.17 แก้วสำหรับวางทับกระดาษ มีดัชนีหักเห 1.56 รัศมีความโค้ง 80 เซนติเมตร บนกระดาษมี



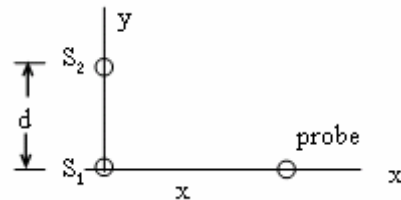
รูปวงกลมขนาด 1 มิลลิเมตร จะมองเห็นวงกลมอยู่ห่างจากผิวแก้วกี่เซนติเมตร (-0.192 เซนติเมตร)

- 7.18 แสงความยาวคลื่น 5.9×10^{-7} เมตร ผ่านช่องแคบเล็ก ๆ 2 ช่องซึ่งอยู่ห่างกัน 0.8 มิลลิเมตรฉากอยู่ห่างจากช่องแคบ 0.5 เมตร จงหาระยะห่างระหว่างริ้วมืดหรือริ้วสว่างที่อยู่ติดกัน (3.7 มิลลิเมตร)

- 7.19 ในการทดลองของยัง ช่องแคบคู่อยู่ห่างกัน 0.5 มิลลิเมตร แสงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 480 นาโนเมตร ต้องวางฉากห่างจากช่องแคบเท่าใดจึงจะได้แถบสว่างที่อยู่ติดกันอยู่ห่างกัน 1 มิลลิเมตร (1.042 เมตร)

- 7.20 S_1 และ S_2 เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์อยู่ห่างกัน 4 เมตร ความยาวของคลื่นเท่ากับ 1 เมตร เมื่อตรวจจับคลื่นเคลื่อนอยู่บนแกน x จงหาค่าสูงสุดอันดับแรกที่ใกล้ที่สุด

$$\left[x = \frac{d^2 - n^2 \lambda}{2n}, x = 7/6, 3, \frac{15}{2} \text{ เมตร} \right]$$



รูปสำหรับข้อ 20



7.21 การทดลองการแทรกสอดของยังใช้คลื่นแสงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร วางฉากห่างจาก ผู้สังเกต 2 เมตร กำหนดให้ความสามารถในการจำแนกรายละเอียดเชิงมุม (angular resolution) ของตามนุษย์มีค่าเท่ากับ 1 นิ้ว (0.000291 เรเดียน) ช่องแคบคู่จะต้องอยู่ห่างกันเท่าใด ผู้สังเกตจึงจะจำแนกแถบมืดแถบสว่างที่เกิดขึ้นได้ ($\sin \theta_m \approx \theta_m = \frac{\lambda}{d} \approx 0.000291$ จะได้ $d = 1.72.22$)

7.22. ในการทดลองการแทรกสอดของยัง ช่องแคบคู่อยู่ห่างกัน 2 มิลลิเมตร คลื่นแสงมีความยาวคลื่น 750 นาโนเมตร และ 900 นาโนเมตร ฉากอยู่ห่างจากช่องแคบคู่ 2 เมตร จงหา ระยะห่างที่สั้นที่สุดวัดจาก แถบสว่างสุดที่เกิดจากคลื่นทั้งสองซ้อนทับกันพอดี (แถบที่ 6 ของแสง $\lambda = 750$ นาโนเมตร และแถบที่ 5 ของแสง $\lambda = 900$ นาโนเมตร ที่ตำแหน่ง 4.5 มิลลิเมตร)

7.23 คลื่นแสงมีความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ผ่านช่องแคบคู่ในเวลาเดียวกัน พบว่าแถบสว่างที่ 3 ของ λ_1 ซ้อนทับกับแถบสว่างที่ 4 ของ λ_2 พอดี จงเปรียบเทียบความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ($\lambda_2 = 3\lambda_1/4$)

7.24 แสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 630 นาโนเมตร ผ่านช่องแคบคู่พบว่าเกิดแถบสว่าง 2 แถบซึ่งอยู่ติดกัน ห่างกัน 8.3 มิลลิเมตร เมื่อนำแสงความยาวคลื่น λ มาฉายแทนเลเซอร์ พบว่าแถบสว่าง 2 แถบ ซึ่งอยู่ติดกัน ห่างกัน 7.6 มิลลิเมตร จงหาค่า λ (5.77 นาโนเมตร)

7.25 แสงอาทิตย์ตกกระทบฟองสบู่ในแนวตั้งฉาก ได้แสงสะท้อนสีแดงความยาวคลื่น 700 นาโน- เมตร ดัชนีหักเหของฟองสบู่ 4/3 ฟองสบู่มีความหนาเท่าใด (131.25 นาโนเมตร)

7.26 แสงอาทิตย์ตกกระทบฟิล์มสบู่ในแนวตั้งฉากสะท้อน ทำให้เกิดการแทรกสอดค่าสูงสุดที่ 600 นาโนเมตร และความเข้มต่ำสุดที่ 450 นาโนเมตร โดยไม่มีค่าต่ำสุดแทรกอยู่ระหว่างกลางเลย ถ้าฟิล์มมี $n = 1.33$ ฟิล์มมีความหนาสม่ำเสมอ จงคำนวณความหนาของฟิล์ม (337.5 นาโนเมตร)

7.27 ฟิล์มน้ำมัน $n = 1.3$ เคลือบบนผิวแก้ว $n = 1.5$ แหล่งกำเนิดแสงให้แสงสีเดียว แต่สามารถ ปรับให้เปลี่ยนค่าความยาวคลื่นได้ รวบรวมการแทรกสอดที่เกิดจากการสะท้อนของแสงเกิด ขึ้นที่ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร และ 700 นาโนเมตร และไม่มีค่าความยาวคลื่นอื่นระหว่างกลาง จงหาความหนาของฟิล์มน้ำมัน (670 นาโนเมตร)



7.28 ช่องแคบเดี่ยวและฉากอยู่ห่างกัน 50 เซนติเมตร แสงความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร ผ่าน ช่องแคบนี้ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนบนฉาก ระยะห่างระหว่างค่าต่ำสุดที่ 1 และที่ 3 อยู่ห่างกัน 3 มิลลิเมตร จงหาขนาดของช่องแคบ (0.227 มิลลิเมตร)

7.29 แสงความยาวคลื่น 587.5 นาโนเมตร ผ่านช่องแคบเดี่ยวมีความกว้าง 0.75 มิลลิเมตร
ก. จงหาระยะห่างระหว่างฉากกับช่องแคบเดี่ยว ถ้าแถบมืดค่าต่ำสุดที่ 1 ของการเลี้ยวเบนอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางของแถบสว่างสูงสุดเท่ากับ 0.85 มิลลิเมตร (1.09 เมตร)
ข. จงคำนวณหาความกว้างของแถบสว่างสูงสุด (1.70 มิลลิเมตร)

7.30 ไฟหน้ารถยนต์ 2 ดวงอยู่ห่างกัน 1.42 เมตร เพราะผลของการเลี้ยวเบน มนุษย์จะยังคงมองเห็นไฟหน้ารถยนต์เป็น 2 ดวงได้ที่ระยะไกลที่สุดเท่าใด ให้ช่องตาดำของนัยน์ตาเป็นรู วงกลมขนาด 4.00 มิลลิเมตร (วัดขณะที่แสงสว่างค่อนข้างน้อย) ให้แสงไฟรถยนต์มีความยาวคลื่นเฉลี่ย 600 นาโนเมตร (7.76 กิโลเมตร)

7.31 ดาวเทียมจรวดกรรมอยู่สูงจากโลก 150 กิโลเมตร มีกล้องสำรวจภาคพื้นดิน ซึ่งมีเลนส์เส้นผ่าศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร ถ้าความสามารถของกล้องถูกจำกัดด้วยการเลี้ยวเบนของแสง วัตถุ 2 ชิ้นวางห่างกันอย่างน้อยที่สุดเท่าใดจึงสามารถจำแนกวัตถุทั้งสองได้ที่ความยาวคลื่นแสง 5500 แองสตรอม (29 เซนติเมตร)

7.32 ถ้าความเข้มของแสงลดลงเหลือเพียง 1/10 ของความเข้มของแสงก่อนที่ผ่านตัววิเคราะห์ จงคำนวณหามุมระหว่างแกนส่งผ่านของตัวโพลาไรซ์และตัววิเคราะห์ (71.6 องศา)

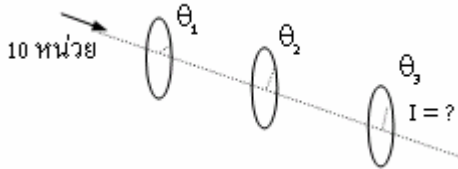
7.33 นำแผ่นโพลาไรซ์ 2 ชั้น วางให้แกนส่งผ่านขนานกัน จากนั้นหมุนแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 1 อยู่ด้านหลังให้เปลี่ยนไปจากเดิม 60 องศา จงหาอัตราส่วนความเข้มของแสงก่อนที่จะผ่าน แผ่นหลังกับหลังจากแสงผ่านแผ่นหลังแล้ว (4)



7.34 เมื่อใช้แผ่นโพลาไรซ์ 2 แผ่นดูแสงสว่างจากหลอดไฟ แขนงผ่านของแผ่นโพลาไรซ์ ต้องทำมุมเท่าใดที่ผ่านออกมาจึงมีความเข้มลดลงไปครึ่งหนึ่งของความเข้มเดิม (0)

7.35 แผ่นโพลาไรซ์ 3 แผ่น วางให้แกนส่งผ่านขนานกัน แสงมีความเข้ม 10 หน่วย จงหาความเข้มของแสงเมื่อเดินทางผ่านแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสามแผ่น เมื่อ $\theta_1 = 20^\circ$, $\theta_2 = 40^\circ$ และ $\theta_3 = 60^\circ$

(6.89 หน่วย)



รูปสำหรับข้อ 35

7.36 ดวงอาทิตย์จะต้องอยู่สูงจากขอบฟ้าเท่าใด แสงที่สะท้อนจากผิวน้ำจึงจะเป็นแสงโพลาไรซ์ 100%

(37 องศา)