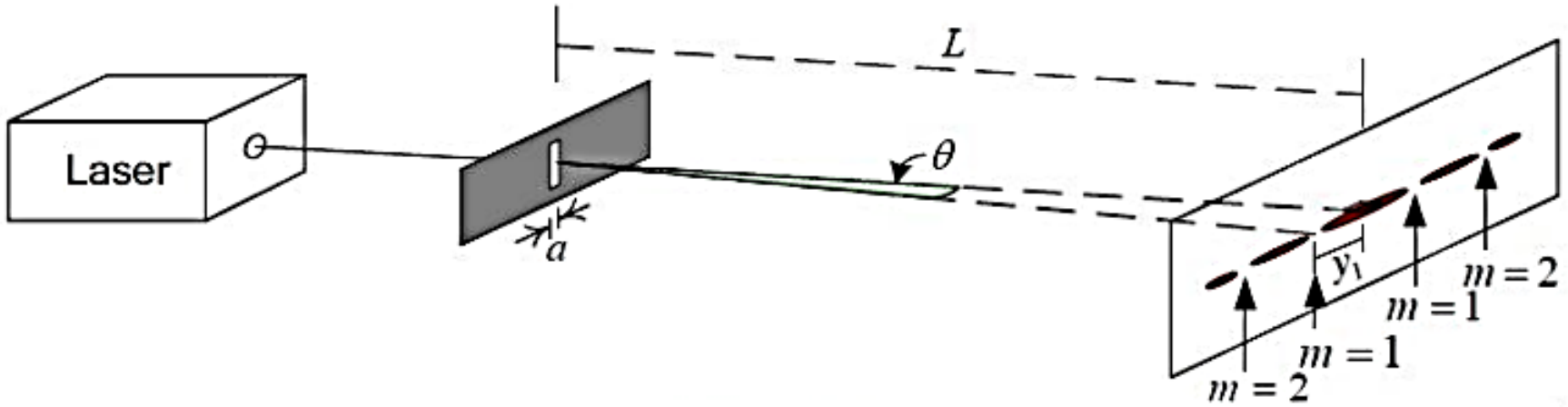
บทที่ 5
การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสง

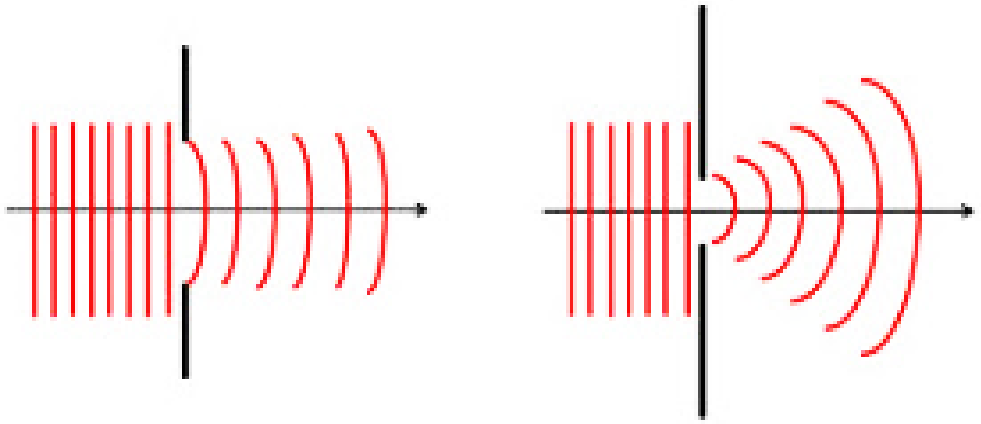


สอนโดย อ.ดร.รูฮัยซา ดือราแม

5.1 ความรู้ทั่วไปของการเลี้ยวเบนของแสง

ถึงแม้แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรงแต่เมื่อเคลื่อนที่ชนสิ่งกีดขวางแสงบางส่วนสามารถเคลื่อนที่อ้อมสิ่งกีดขวางได้ เรียกแสงส่วนที่สามารถเคลื่อนที่อ้อมสิ่งกีดขวางได้นี้ว่า “แสงเลี้ยวเบน (Diffracted light)” และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction of light)” เช่น เมื่อแสงผ่านขอบคมของวัตถุจะเกิดแถบมืดสว่างใกล้เงาวัตถุ เนื่องจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนอันเป็นธรรมชาติของ “คลื่นแสง”

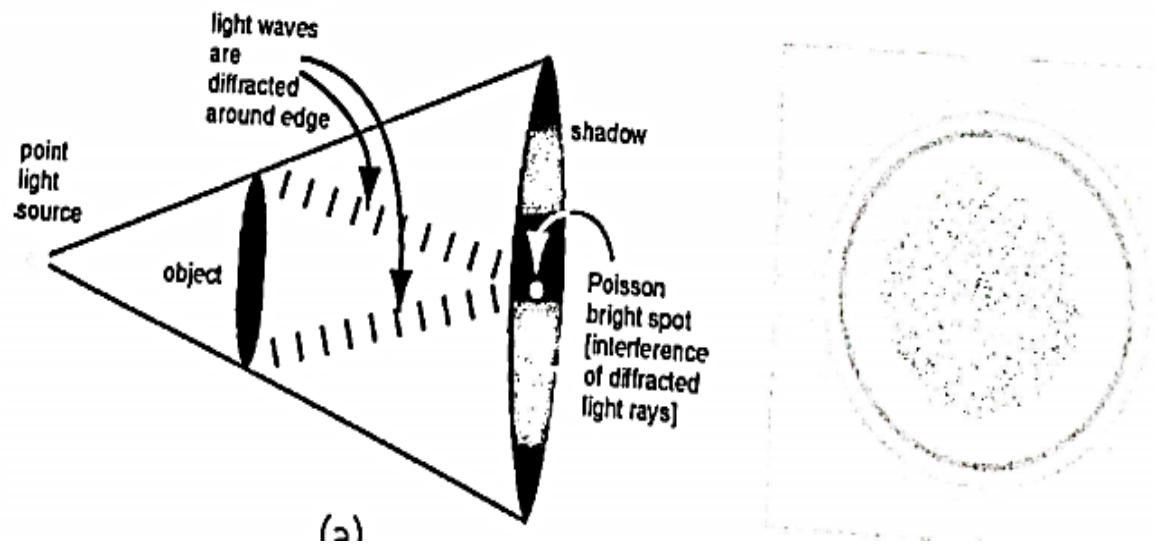
แสงเดินทางเป็นคลื่น ซึ่งการเลี้ยวเบนของแสงจะเกิดขึ้นเมื่อคลื่นแสงเจอสิ่งกีดขวาง ซึ่งส่งผลให้คลื่นแสงบิดเบี้ยวเนื่องจากคลื่นแสงจำเป็นต้องแผ่ขยายผ่านช่องว่างออกไป ในกรณีของเลนส์ถ่ายภาพนั้นการบิดเบี้ยวของคลื่นแสงจะเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางผ่านรูรับแสงของเลนส์ ซึ่งการเลี้ยวเบนของแสงจะมีการเลี้ยวเบนเพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นแสงลอดผ่านรูรับแสงที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การเลี้ยวเบนของแสงเพิ่มขึ้นเมื่อคลื่นแสงลอดผ่านรูรับแสงที่มีขนาดเล็กกว่าเดิม

(ที่มา:https://www.nikonimgsupport.com/na/NSG_article?articleNo=000028155&configured=1&lang=th)

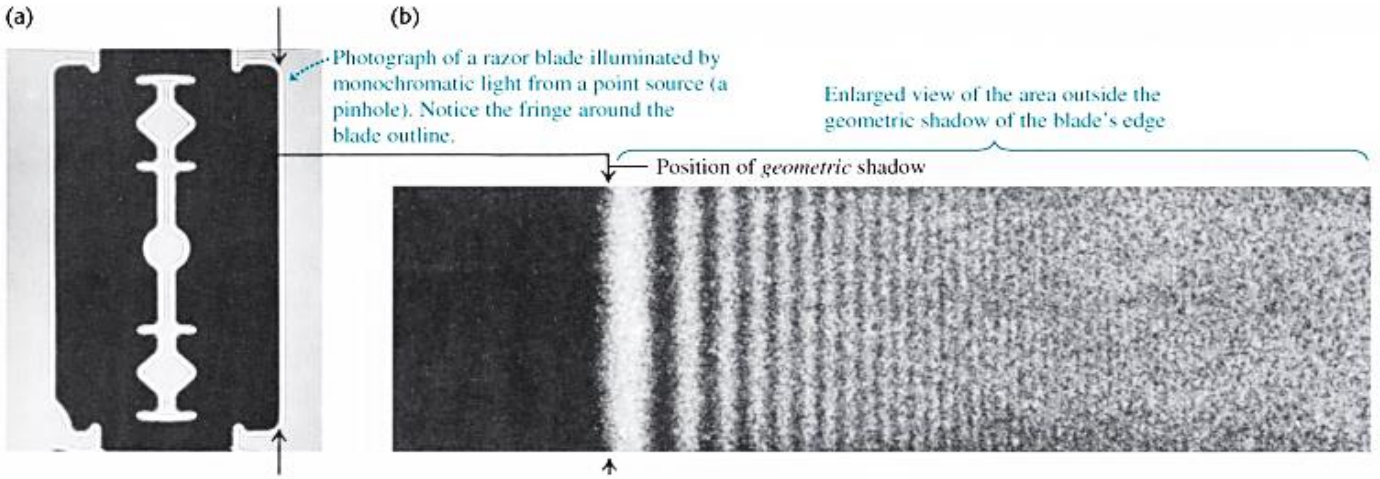
ในชีวิตประจำวันนั้นไม่ค่อยได้เห็นการเลี้ยวเบนของแสงได้ง่ายนัก แต่สามารถทำการทดลองให้เห็นการเลี้ยวเบนของแสงได้ไม่ยาก โดยการนำเอาเหรียญมารับแสงแล้วสังเกตที่เงาดำจะพบว่ามีจุดสว่างอยู่ตรงกลาง ดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 (a) เงาของวัตถุ (b) เงาดำ มีจุดสว่างตรงกลาง
(ที่มา: สุชาติ สุภาพ, 2558)

- จุดสว่างที่จุดกึ่งกลางเงาดำนี้พบครั้งแรกโดยปัวซองนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศส ปัวซองได้นำเอาทฤษฎีที่เฟสเนลเสนอไปลองคำนวณดู แล้วพบว่าถ้านำเหรียญหรือวัตถุกลมใดๆ ไปวางรับแสง เงาของวัตถุเหล่านั้นจะมีจุดสว่างที่เกิดจากการแทรกสอดของแสงบริเวณจุดกึ่งกลาง ซึ่งปัวซองได้ทำการทดลองใหม่จึงพบว่ามีจุดสว่างที่เกิดขึ้นบริเวณจุดกึ่งกลาง

นอกจากนี้ยังมีการทดลองอื่นๆ ที่ต้องการสำรวจถึงลวดลายของการเกิดการเลี้ยวเบนของแสง ตัวอย่างเช่น เอาใบมีดโกนมาบังแสงให้เกิดเงา พบว่าเงามีลวดลายการเลี้ยวเบนและแทรกสอดของแสง ดังรูปที่ 5.3



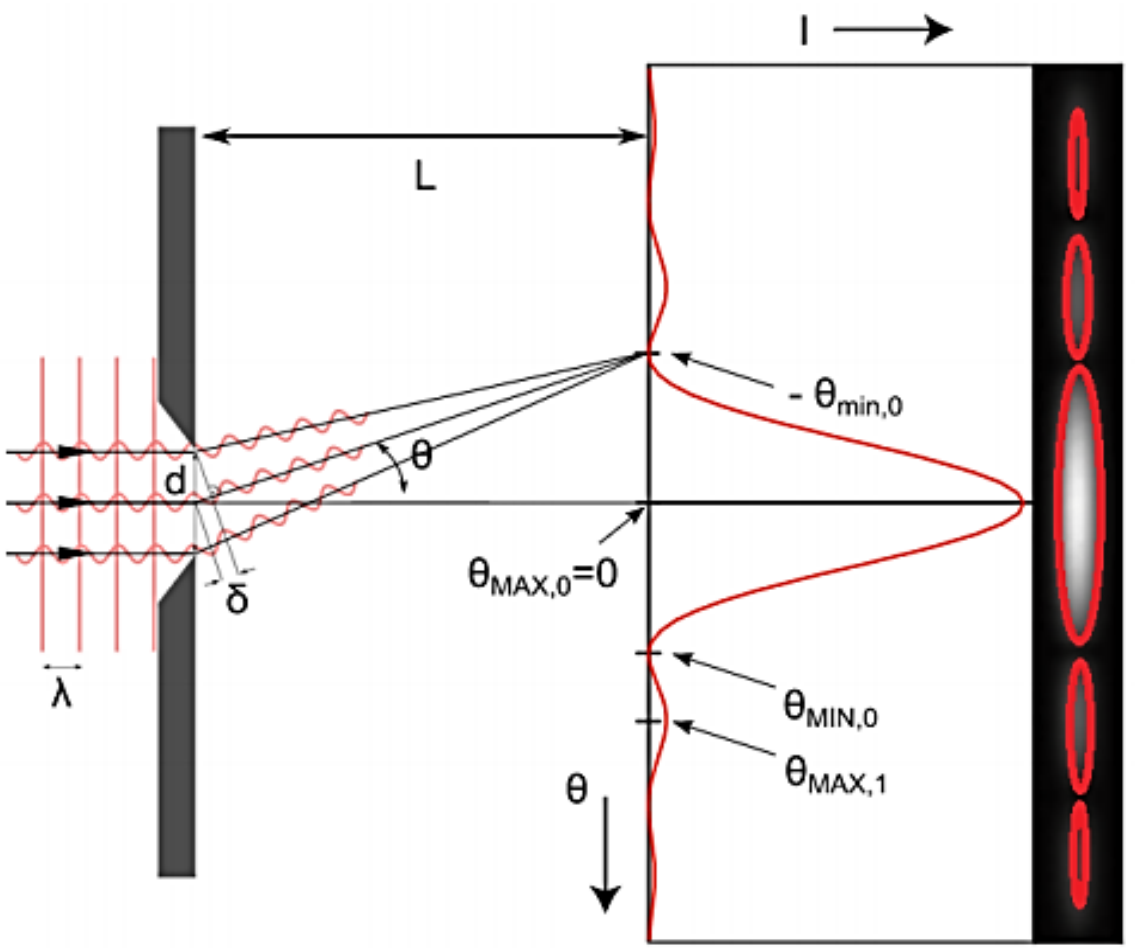
รูปที่ 5.3 เงาของใบมีดโกน

(ที่มา: https://yingyotinfahsaeng.files.wordpress.com/2019/03/l4-waveoptic.pdf)

- จากรูปที่ 5.3 เป็นการแสดงตัวอย่างการเลี้ยวเบนที่เกิดจากการวางใบมีดโกนที่กึ่งกลางระหว่างรูเข็มซึ่งถูกส่องด้วยแสงเอกรงค์และฟิล์มถ่ายรูปภาพขยายทางขวาจะแสดงบริเวณใกล้เงาของขอบซ้ายของใบมีด ลูกศรบอกตำแหน่งของเส้นเงาเชิงเรขาคณิต พื้นที่นอกเงาเชิงเรขาคณิตมีแถบสว่างและแถบมืดสลับกันล้อมรอบขอบ และมีแสงนิดหน่อยในบริเวณเงา

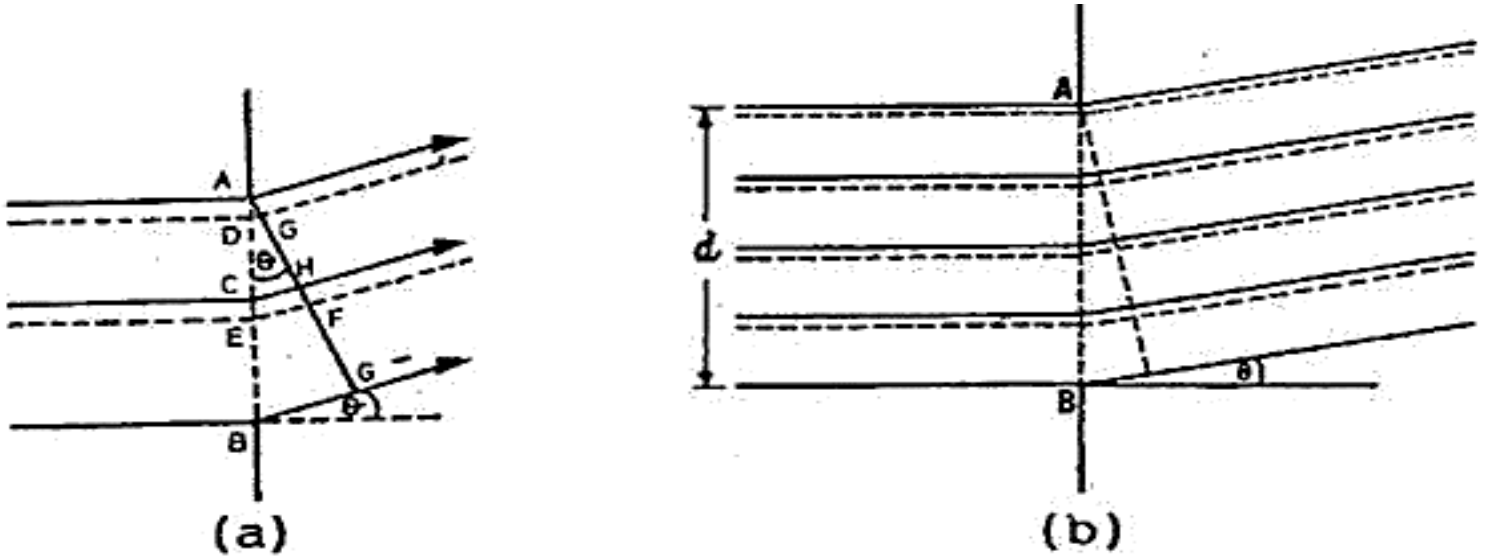
5.2 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบ

เมื่อให้แสงเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบเดียวจะได้แถบสว่างตรงกลางกว้างและมีความเข้มมากที่สุดแถบสว่างข้างๆ ที่สลับแถบมืดจะมีความเข้มลดลง ถ้าแสงที่ผ่านช่องแคบเป็นแสงสีขาวจะได้แถบสว่างเป็นสีขาวและแถบสว่างข้างๆ จะเป็นสเปคตรัมโดยเรียงจากมีม่วงไปจนถึงสีแดงแต่ถ้าเป็นแสงสีเดียวแถบสีสว่างข้างๆจะเป็นสีเดิมแถบสว่างตรงกลางจะกว้างมากที่สุดและแถบสว่างข้างๆ จะลดลงครึ่งหนึ่งและมีขนาดกว้างเกือบเท่ากันหมด ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ภาพจำลองการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ผ่านช่องสลิตเดี่ยว (single slit)
(ที่มา: https://cse.wu.ac.th/wp-content/uploads/2020/05/JSPHY04.pdf)

รูปที่ 5.4 เป็นภาพจำลองการเลี้ยวเบนของแสงเลเซอร์ผ่านช่องสลิตเดี่ยว โดยอาศัยหลักการของฮอยเกนส์ ซึ่งกล่าวว่า ทุกจุดบนหน้าคลื่นจะกระทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ ถ้าให้ฉากอยู่ห่างจากช่องเดี่ยวมากๆ จะได้รังสีที่ออกจากช่องเดียวเป็นรังสีขนานและตำแหน่งมืดบนฉากคือตำแหน่งที่คลื่นหักล้างกัน ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 รังสีขนานจากช่องเดียว

(ที่มา: https://sites.google.com/site/nobphonback/kar-leiyw-ben-khxng-saeng)

5.2.1 การเกิดแถบมืด

จากรูปที่ 5.5 (a) ถ้าแบ่งครึ่งช่อง AB จะพบว่าถ้ารังสีออกจาก A และ C มีทางเดินต่างกัน λ /2 แล้วทุกๆ คู่ที่อยู่ใต้ A และ B ซึ่งห่างกัน d/2 เช่น D และ E จะมีทางเดินต่างกัน λ /2 เป็นผลทำให้คลื่นหักล้างกันหมดบนฉากจะได้ว่าแต่ละคู่มีเงื่อนไขดังนี้

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

เมื่อ $\frac{d}{2}\sin\theta = \lambda$ เป็นตำแหน่งบัพที่ 1

- ถ้าแบ่งตำแหน่งกว้าง d เป็น 4 ส่วนๆกัน ดังรูปที่ 5.5 (b) จะได้ทุกๆ คู่ มีระยะห่างกัน d/4 และจะหักล้างกันเมื่อทางเดินต่างกัน λ /2 นั่นคือ

$$\frac{d}{4}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$$

เมื่อ $d\sin\theta = \lambda/2$ เป็นตำแหน่งบัพที่ 2

➢ ถ้าแบ่งช่องกว้าง d เป็น 6, 8, 10 ,... จะได้ $\frac{d}{2}\sin\theta = \frac{\lambda}{2}$ = 3λ, 4λ, 5λ... ตามลำดับ ซึ่งจะได้สมการหาตำแหน่งบัพของการเลี้ยวเบนของแสงสว่างช่องเดียวดังนี้

$$d\sin\theta = \frac{n}{2}$$

หรือ

$$d\sin\theta = \frac{dy}{D} = n\lambda$$

5.2.2 การเกิดแถบสว่าง

การพิจารณาหาตำแหน่งปฏิบัพโดยตรงไม่มีการพิจารณาตำแหน่งปฏิบัพหาได้จากการเฉลี่ยตำแหน่งบัพ ซึ่งสมการปฏิบัพ คือ

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

❖ เมื่อ D >> d ทำให้มุม θ มีค่าน้อยๆ จนถือได้ว่า $\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{x}{D}$

สมการการหาแถบมืด คือ

$$\frac{dx}{D} = n\lambda$$

เมื่อ a เป็นความกว้างของช่องสลิตเดี่ยว

x เป็นระยะจากแนวกลางถึงแถบมืด

D เป็นระยะระหว่างฉากกับสลิต

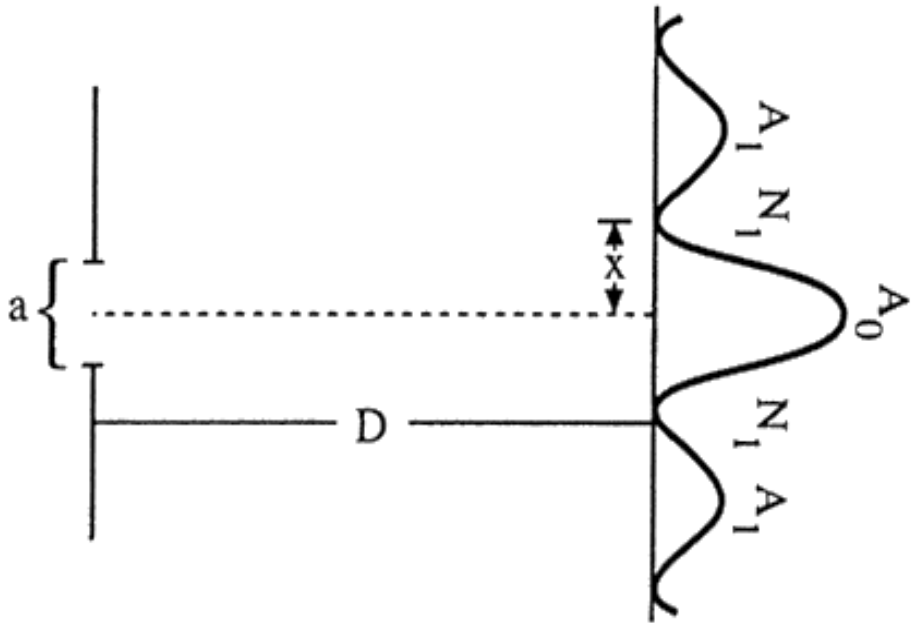
n เป็นแนวบัพหรือแถบมืด ที่ 1, 2, 3, ...

❖ สรุปสมการการเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบเดี่ยว

แถบมืด	แถบสว่าง
$d \sin\theta = n\lambda$	$d \sin\theta = (n + \frac{1}{2})\lambda$
$\frac{dx}{D} = n\lambda$	$\frac{dx}{D} = (n + \frac{1}{2})\lambda$
n เป็นแถบมืด	n เป็นแถบสว่าง
n = 1, 2, 3, ...	n = 0, 1, 2, ...

ตัวอย่างที่ 1 แสงสีแสดความยาวคลื่น 600 nm ตกกระทบตั้งฉากผ่านสลิตเดี่ยว มีความกว้างของช่องเป็น 10 μm สลิตห่างจากฉาก 1 เมตร จงหาความกว้างของแถบสว่างกลาง

วิธีทำ ความกว้างของแถบสว่างกลางหาได้จากระยะห่างของแถบมืดแถบแรก



ความกว้างของแถบสว่างกลางเท่ากับ 2x

$$\frac{dx}{D} = n\lambda$$

เมื่อ d = 10 μm, D = 1 m, n = 1 และ λ = 600 nm

$$x = \frac{1 \times 600 \times 10^{-9} \times 1}{10 \times 10^{-6}} = 60 \times 10^{-3} \text{ m}$$

ตอบ ความกว้างของแถบสว่างกลางเป็น 2x = 120×10^{-3} m

ตัวอย่างที่ 2 แสงเลเซอร์ความยาวคลื่น 630 nm ตกตั้งฉากผ่านสลิตเดี่ยว เกิดการเลี้ยวเบนบนฉากห่างออกไป 3 m ความกว้างของแถบสว่างกลางเป็น 1.5 cm สลิตจะมีความกว้างเท่าใด

วิธีทำ ความกว้างของแถบสว่างกลางเป็น 1.5 cm

$$\frac{dx}{D} = n\lambda$$

เมื่อ x = 0.75 cm, D = 3 m, n = 1 และ λ = 630 nm

$$d = \frac{1 \times 630 \times 10^{-9} \times 3}{0.75 \times 10^{-2}}$$

$$= 252 \times 10^{-6} \text{ m}$$

ตอบ สลิตจะมีความกว้างเป็น 252 ไมโครเมตร

ตัวอย่างที่ 3 สลิตเดี่ยวอันหนึ่งกว้าง 0.05 mm ให้แสงความยาวคลื่นเดียวตกตั้งฉากเกิดการเลี้ยวเบนไปบนฉากห่างออกไป 90 cm แถบสว่างกลางกว้าง 1.8 cm จงหาความยาวคลื่นแสงนี้

วิธีทำ การเลี้ยวเบนของสลิตเดี่ยวแถบมืด

เมื่อ $x = 1.82 = 0.9$ cm, $a = 0.05$ m, $D = 90$ cm, $n = 1$

$$\frac{dx}{D} = n\lambda$$

$$\frac{(50 \times 10^{-3})(0.9 \times 10^{-2})}{(90 \times 10^{-2})} = (1)\lambda$$

$\lambda = 500 \times 10^{-9}$ m หรือ $\lambda = 500$ นาโนเมตร

ตอบ ความยาวคลื่นแสงนี้เป็น 500 นาโนเมตร

5.3 เกรตติงเลี้ยวเบน

เมื่อริ้วการเลี้ยวเบนที่เกิดจากช่องแคบกว้าง b และห่างกัน a เป็นจำนวนมากให้ N เป็นจำนวนช่องแคบ ดังรูปที่ 5.6 โดยอาศัยความคล้ายคลึงกับปัญหาของช่องแคบคู่ในทิศทาง θ จะได้การแทรกสอดของแสงจากดวงไฟอาพันธ์ N ดวงโมดูเลต โดยริ้วการเลี้ยวเบนของช่องแคบเดี่ยว

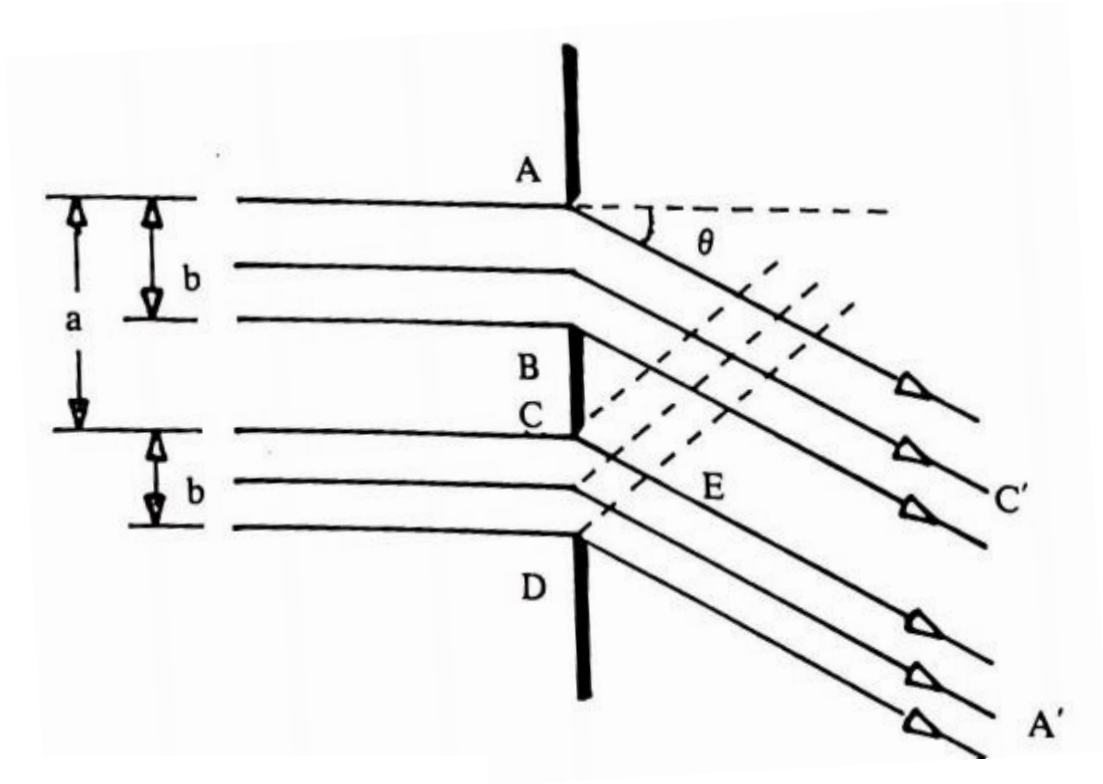
ถ้าจำนวนช่องแคบ N มีค่ามาก ริ้วการเลี้ยวเบนจะประกอบด้วยแถบสว่างแคบๆ เป็นจำนวนมากสอดคล้องกับตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดของริ้วการเลี้ยวเบน ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งในกรณีที่แสงตกตั้งฉากสามารถหาค่าได้จากโดยสมการ 5.4 ดังนี้

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

ซึ่ง m = 0, $\pm 1, \pm 2, \ldots$ แต่ความเข้มถูกโมดูเลตโดยริ้วการเลี้ยวเบนจากช่องแคบเดี่ยว ซึ่งมีตำแหน่งความเข้มศูนย์ตามสมการ $b \sin\theta = m'\lambda$ *โดย* $m' = \pm 1, \pm 2, \ldots$

ช่องแคบ 1

ช่องแคบ 2



รูปที่ 5.6 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบจำนวนมาก
(ที่มา: อนันตสิน เตชะกำพุช และพิศิษฐ์ รัตนวรารักษ์, 2559)

- เมื่อแสงขนานสองลำที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันเล็กน้อยตกบนเกรตติงเลี้ยวเบน ตำแหน่งของจุดสูงสุดมุขยสำคัญของแต่ละคลื่นในอันดับเดียวกัน อาจอยู่ชิดกันมากจนไม่สามารถบอกได้ว่าต้นแสงเป็นแสงเอกรงค์ (monochromatic) หรือมีความยาวคลื่นหลายขนาด เพื่อที่จะให้สังเกตได้ว่า คลื่นสองคลื่นแยกกันอย่างน้อยที่สุดตำแหน่งสูงสุดมุขยสำคัญของคลื่นหนึ่งต้องตกตรงตำแหน่งมืดครั้งแรกข้างใดข้างหนึ่งของตำแหน่งสูงสุกมุขยสำคัญอีกคลื่นหนึ่งในลำดับเดียวกัน ถ้าให้ $\Delta\lambda$ เป็นความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่นทั้งสองที่ให้ผลตามเงื่อนไขข้างต้น กำลังแยกของเกรตติงกำหนดให้เป็น $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ ซึ่งอาจแสดงให้เห็นได้ดังสมการที่ 5.5 ดังนี้

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm$$

  - โดยที่ N เป็นจำนวนเส้นทั้งหมด และ m เป็นลำดับของการเลี้ยวเบน ดังนั้นจำนวนเส้นในเกรตติงยิ่งมากและลำดับการเลี้ยวเบนยิ่งสูง กำลังแยกของเกรตติงก็จะสูงด้วย

ตัวอย่างที่ 4 จงหามุมที่รองรับสเปกตรัมที่ตามองเห็น ลำดับที่หนึ่งและลำดับที่สอง ที่เกิดจากเกรตติงที่มีจำนวนเส้นทั้งหมด 20,000 เส้น และมีความกว้าง 4 เซนติเมตร โดยถือว่าสเปกตรัมที่ตามองเห็นมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 3.90×10^{-7} เมตร ถึง 7.70×10^{-7} เมตร

วิธีทำ จาก $a \sin\theta = m\lambda$ เมื่อ $a = 4 \times 10^{-2}/20{,}000 = 2 \times 10^{-6}$ เมตร

ดังนั้น สำหรับสเปกตรัมลำดับที่หนึ่ง $m = 1$ จะได้

$$\sin\theta \text{ (แดง)} = \frac{7.70 \times 10^{-7}}{2 \times 10^{-6}} = 0.335$$

$$\theta \text{ (แดง)} = 19^{\circ}34'$$

$$\sin\theta \text{ (ม่วง)} = \frac{3.90 \times 10^{-7}}{2 \times 10^{-6}} = 0.195$$

$$\theta \text{ (ม่วง)} = 11^{\circ}15'$$

ตอบ สเปกตรัมที่ตามองเห็นลำดับที่หนึ่งรองรับมุม $= 19^{\circ}34' - 11^{\circ}15' = 8^{\circ}19'$

ตัวอย่างที่ 5 จงคำนวณเพื่อแสดงว่าเกรตติงในตัวอย่างที่ 4 สามารถแยกเส้นสีเหลืองสองเส้นของแสงโซเดียม ซึ่งมีความยาวคลื่น 5.890×10^{-7} เมตร กับ 5.896×10^{-7} เมตรได้หรือไม่

วิธีทำ จาก $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ = Nm

ในที่นี้ λ เป็นค่าเฉลี่ย = $\frac{1}{2}(5.890 \times 10^{-7} + 5.896 \times 10^{-7})$ = 5.893×10^{-7} เมตร

สำหรับสเปกตรัมลำดับที่หนึ่ง R = 1 x 20,000

ดังนั้น $\Delta\lambda = \frac{\lambda}{R} = \frac{5.893 \times 10^{-7}}{20{,}000} = 2.947 \times 10^{-11}$ เมตร

แต่สีเหลืองสองเส้นมีความยาวคลื่นต่างกัน

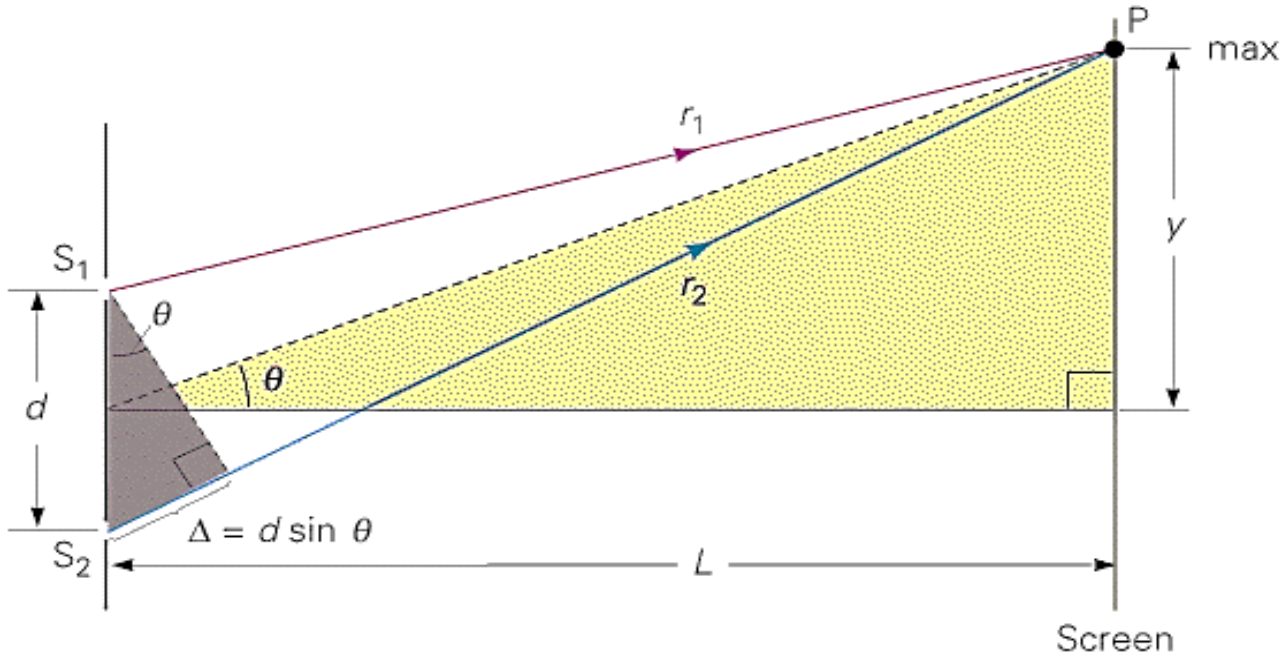
$= (5.896 \times 10^{-7} - 5.890 \times 10^{-7})$

$= 6 \times 10^{-10}$ เมตร

ตอบ เกรตติงดังกล่าวสามารถแยกเส้นสีเหลืองทั้งสองได้ชัดเจนมาก

5.4 การแทรกสอดของแสง

การแทรกสอดของแสง (Interference) เกิดได้ต่อเมื่อคลื่นแสง 2 ขบวนเคลื่อนที่มาพบกัน จะเกิดการรวมตัวกันและแทรกสอดกันเกิดเป็นแถบมืดและแถบสว่างบนฉาก โดยแหล่งกำเนิดแสงจะต้องเป็นแหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent Source) คือ เป็นแหล่งกำเนิดที่ให้คลื่นแสงความถี่เดียวกันและความยาวคลื่นเท่ากัน ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านช่องแคบจำนวนมาก

(ที่มา: http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_21.htm)

- จากรูปที่ 5.7 ถ้าให้ช่องแคบ S_1 และ S_2 เป็นแหล่งกำเนิดแสงห่างกันเป็นระยะ d เมื่อแสงเดินทางจากช่องแคบมาถึงฉากด้วยระยะทางที่ต่างกัน เดินทางมาพบกันบนจุดเดียวกันคือจุด P จะได้ผลต่าง S_1P กับ S_2P เป็นดังสมการ 5.6 ดังนี้

$$S_2P - S_1P = d \sin\theta$$

การแทรกสอดจะมีแบบเสริมกันและแบบหักหลังกัน โดยทำการพิจารณาดังนี้

1. เมื่อ S_1 , S_2 มีเฟสตรงกัน

- การแทรกสอดแบบเสริมกัน

$$S_2P - S_1P = n\lambda$$

$$d \sin\theta = n\lambda$$

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

เมื่อ n = 0, 1, 2, 3, ...

- การแทรกสอดแบบหักล้างกัน

$$S_2P - S_1P = \left(\frac{n-1}{2}\right)\lambda$$

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

$$d\frac{y}{L} = \left(\frac{n-1}{2}\right)\lambda$$

เมื่อ n = 1, 2, 3, ...

2. เมื่อ S_1 , S_2 มีเฟสตรงข้ามกัน

- การแทรกสอดแบบเสริมกัน

$$S_2P - S_1P = \left(\frac{n-1}{2}\right)$$

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

$$d \frac{y}{L} = \left(\frac{n-1}{2}\right) \lambda$$

เมื่อ n = 1, 2, 3, ...

- การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (แนวกลางเป็นแนวบัพ N_0)

$$S_2P - S_1P = n \lambda$$

$$d \sin\theta = n \lambda$$

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

เมื่อ n = 0, 1, 2, 3, ...

คำถามท้ายบท

1. เมื่อให้แสงขนานตกตั้งฉากกับเกรตติงที่มีความถี่ 6,000 เส้นต่อเซนติเมตร แสงเลี้ยวเบนลำดับที่หนึ่งเบี่ยงเบนไปเป็นมุม 20.7 องศา จงคำนวณหาความยาวคลื่นของแสงที่ใช้
2. เส้นขนานความยาวคลื่น 6,000 อังสตรอม ตกตั้งฉากบนเกรตติงที่มีจำนวนเส้น 5,000 เส้นต่อหนึ่งเซนติเมตร จงหามุมเบี่ยงเบนของแสงเลี้ยวเบนลำดับที่หนึ่ง ที่สอง และที่สาม
3. ให้นักศึกษาหาโจทย์ที่เกี่ยวข้องกับการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงอีก 2 ข้อ พร้อมเฉลย