

บทที่ 6

แสง

แสงสามารถแสดงสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค ในบทนี้จะกล่าวถึงแสงเมื่อแสดงสมบัติเป็นคลื่น การศึกษาสมบัติของแสงในบทนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ทศนาศาสตร์เชิงเรขาคณิต ได้แก่ สมบัติเกี่ยวกับการสะท้อนและการหักเหของแสง และทศนาศาสตร์กายภาพ ได้แก่ สมบัติเกี่ยวกับการเลี้ยวเบน การแทรกสอด และโพลาไรเซชัน

พฤติกรรมของแสง

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่เกิดเคลื่อนที่ได้ การเคลื่อนที่ของพลังงานแสงจะอยู่ในรูปของคลื่น ซึ่งมีช่วงความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 380-760 นาโนเมตร ช่วงความยาวคลื่นของพลังงานแสงดังกล่าวช่วยทำให้เกิดการเห็น ส่วนพลังงานรูปอื่นเช่นรังสีอัลตราไวโอเล็ต, รังสีเอ็กซ์ ที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 380 นาโนเมตร หรือคลื่นวิทยุ, คลื่นโทรทัศน์และพลังงานไฟฟ้า ที่มีช่วงความยาวคลื่นยาวกว่า 760 นาโนเมตร พลังงานเหล่านี้มิได้ช่วยให้เกิดการเห็น การกำเนิดแสงสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1. แบบอินแคนเดสเซนซ์ (Incandescence) การกำเนิดแสงที่เกิดจากการเผาหรือการให้พลังงานความร้อน เช่นการเผาแท่งเหล็กที่ความร้อนสูงมากๆโดยการเพิ่มอุณหภูมิไปเรื่อยๆ แท่งเหล็กจะเปลี่ยสีออกทางส้มและเหลืองจ้าสว่างในที่สุด

2. แบบลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence) การกำเนิดแสงที่ไม่ได้เกิดจากการเปลี่ยพลังงานความร้อนให้เป็นพลังงานแสง เช่น แสงจากตัวเมลง,แสงที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี,แสงที่เกิดจากการเปลี่ยวงโคจรของอิเล็กตรอน รวมไปถึงแสงที่เกิดจากการปล่อยประจุของก๊าซ เช่นแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนซ์

พฤติกรรมของแสงได้มีผู้พยายามอธิบายพฤติกรรมของแสงมาตั้งแต่สมัยกรีกโบราณก่อนศตวรรษที่ 17 ในที่สุดก็สรุปเกี่ยวกับพฤติกรรมของแสงไว้ในลักษณะที่อ้างอิงทั้งเป็นอนุภาคและคลื่น ซึ่งพฤติกรรมต่าง ๆ ของแสงสรุปได้ดังนี้

1. การสะท้อน (Reflection) เป็นพฤติกรรมที่แสงตกกระทบบนตัวกลางและสะท้อนตัวออก ถ้าตัวกลางเป็นวัตถุผิวเรียบขจัดมัน จะทำให้มุมของแสงที่ตกกระทบจะมีค่าเท่ากับมุมสะท้อน

2. การหักเห (Refraction) เป็นพฤติกรรมที่ลำแสงหักเหออกจากแนวทางเดินของมันเมื่อพุ่งผ่านวัตถุโปร่งแสง

3. การกระจาย (Diffusion) เป็นพฤติกรรมที่แสงจะกระจายตัวออกเมื่อกระทบผิวของตัวกลาง เราใช้ประโยชน์จากการกระจายตัวของลำแสง เมื่อกระทบตัวกลางนี้ เช่น ใช้แผ่นพลาสติกใสปิดดวงโคม เพื่อลดความจ้าจากหลอดไฟ

4. การดูดกลืน (Absorption) เป็นพฤติกรรมที่แสงถูกดูดกลืนหลายเข้าไปในตัวกลาง โดยทั่วไปเมื่อพลังงานแสงถูกดูดกลืนหายเข้าไปในวัตถุใด ๆ มันจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

5. การทะลุผ่าน (Transmission) เป็นพฤติกรรมที่แสงพุ่งชนตัวกลางแล้วทะลุผ่านมันออกไปอีกด้านหนึ่ง

6. การส่องสว่าง (Illumination) ปริมาณแห่งการส่องสว่างบนพื้นผิวใด ๆ จะแปรตามโดยตรงกับความเข้มแห่งการส่องสว่าง (Illumination Intensity) ของแหล่งกำเนิดแสงและแปรตามอย่างผกผันกับค่าระยะทางยกกำลังสองระหว่างพื้นผิวนั้นกับแหล่งกำเนิดแสง

7. ความจ้า (Brighten) ความจ้าเป็นผลซึ่งเกิดจากการที่แสงถูกสะท้อนออกจากผิววัตถุหรือพุ่งออกจากแหล่งกำเนิดแสงเข้าสู่ตา

อัตราเร็วของแสง

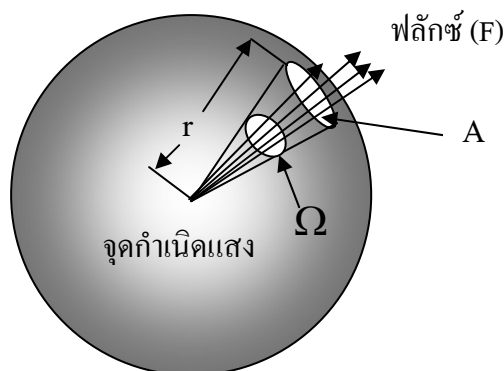
ในตัวกลางชนิดเดียวกันแสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แสงจะเปลี่ยนแนวทางเดินเมื่อเกิดการสะท้อนแสง การหักเห และการเลี้ยวเบน แสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น สามารถแสดงสมบัติของคลื่นได้ทั้ง การแทรกสอด การหักเห และการเลี้ยวเบน นอกจากนี้ยังมี การเกิดโพลาไรเซชันที่แสดงว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง อัตราเร็วของแสงในตัวกลางต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันไป แต่อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศมีค่าคงที่ การทดลองเพื่อหาอัตราเร็วของแสงมีหลายวิธีทั้งทางตรงและทางอ้อม วิธีการวัดแสงทางตรง คือ ทำการทดลองเพื่อหาค่าเวลาในการเดินทางของแสงที่เคลื่อนที่ไปในระยะทางที่ทราบค่าซึ่งจะทำให้ทราบค่าอัตราเร็วของแสง เช่น การทดลองหาอัตราเร็วแสงของฟิโซ (Fizeau's Method) วิธีของฟูคอลลท์ (Foucault's Method) วิธีการของไมเคิลสัน (Michelson's Method) เป็นต้น ส่วนการวัดอัตราเร็วแสงทางอ้อม ได้แก่ วิธีการหาความคลาดของดาว (Stella Aberration) วิธีการหาอัตราส่วนของค่าคงที่ทางไฟฟ้า (the ratio of electric constant) วิธีการวัดความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น อัตราเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ $299,792,459 \pm 0.8$ เมตรต่อวินาที หรือค่าโดยประมาณที่ใช้ คือ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

การส่องสว่าง

แสงเป็นพลังงาน แต่พลังงานที่แผ่ออกมาจากแหล่งกำเนิดแสงจะมีเพียงบางส่วนที่อยู่ในรูปของแสง พลังงานส่วนนี้อาจอยู่ในรูปของความร้อน เช่นหลอดไฟฟ้า 100 วัตต์ จะใช้กำลังไฟฟ้า 100 วัตต์ แต่กำลังงานทั้งหมดนี้เปลี่ยนมาเป็นกำลังแสงประมาณ ร้อยละ 30 เท่านั้น ความสว่างของหลอดไฟฟ้าแต่ละขนาดจะขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าของหลอด เช่น หลอดไฟฟ้า 60 วัตต์ จะสว่างกว่าหลอด 20 วัตต์ แต่ความสว่างที่เรารู้สึกได้ไม่ได้แปรผันตรงกับกำลังไฟฟ้าของหลอด ซึ่งเป็นเพราะว่า แหล่งกำเนิดแสงไม่ได้ให้แสงออกมาในช่วงที่ตามองเห็นเท่านั้น และตามีความรู้สึกต่อความสว่างของแสงแต่ละช่วงความยาวคลื่นไม่เท่ากัน

ความเข้มของการส่องสว่าง

ความเข้มของการส่องสว่าง (Luminous Intensity) หรือบางทีเรียกว่ากำลังส่องสว่าง (Candle Power) ซึ่งมีหน่วยเป็นแคนเดลา (Candela) ความเข้มของการส่องสว่างหรือกำลังส่องสว่าง 1 แคนเดลา มีค่าเท่ากับความเข้มแห่งการส่องสว่างของวัตถุดำ (Black body) ที่อุณหภูมิเยือกแข็งของพลาคินัม (Platinum) โดยทั่วไป ความเข้มแห่งการส่องสว่างของแหล่งกำเนิดแสงมักจะมีค่าเท่ากัน และสมมาตรกันระหว่างแนวแกนของแหล่งกำเนิดแสงด้วย



รูปที่ 6.1 ฟลักซ์ของการส่องสว่าง

สามารถหาความเข้มของการส่องสว่างได้จากสูตร

$$I = \frac{F}{\Omega}$$

เมื่อ F แทนฟลักซ์ของการส่องสว่าง (Lumens : lm)

I แทนความเข้มของการส่องสว่าง (Candelas : cd)

Ω แทนมุมตัน (Steradians : sr)

ความสว่าง

ความสว่าง (luminance) เป็นปริมาณที่บอกถึงความหนาแน่นของฟลักซ์แสงที่สะท้อนออกมาจากพื้นที่รับแสงต่อหน่วยพื้นที่ต่อหน่วยมุมตัน หรือเป็นความเข้มของการส่องสว่างที่สะท้อนออกมาจากพื้นที่รับแสงต่อหน่วยพื้นที่ สามารถหาความสว่างได้จากสูตร

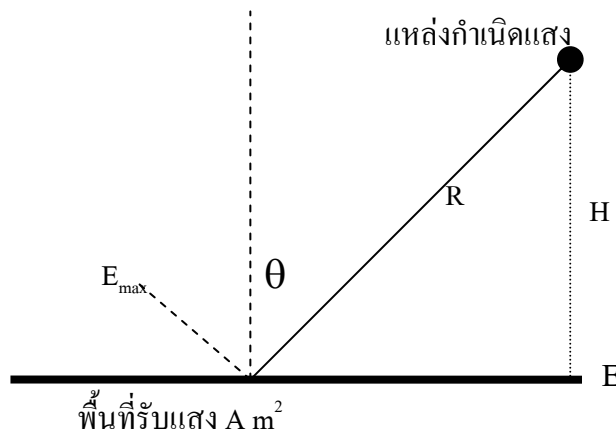
$$E = \frac{F}{A}$$

เมื่อ F แทนฟลักซ์ของการส่องสว่าง (Lumens : lm)

E แทนความสว่าง (Lux)

A แทนพื้นที่ที่ปริมาณฟลักซ์ของการส่องสว่างตกกระทบบ้างจากกับผิววัตถุ (m^2)

การหาความสว่างของแสง ณ จุดใด ๆ บนพื้นที่ผิวที่กำหนด หาได้ดังนี้



รูปที่ 6.2 ความสว่างของแสง ณ จุดใด ๆ บนพื้นที่ผิว

จากรูปต้องการหาความสว่างที่จุด A บนพื้นราบจะได้ว่า

$$E_A = E_{\max} \cos \theta$$

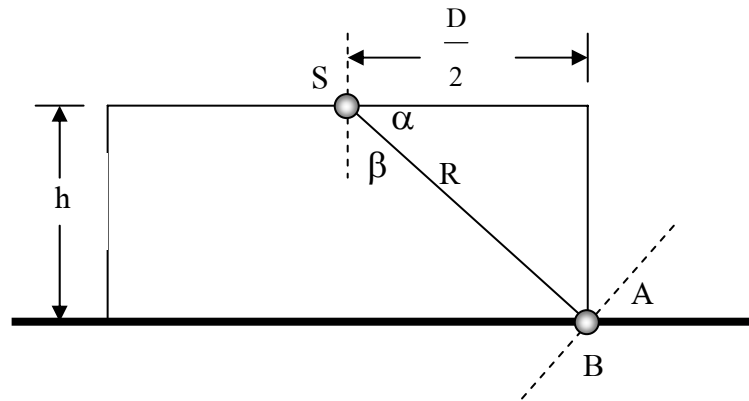
เมื่อ E_{\max} แทนความสว่างของแสงที่มากที่สุดที่จุดนั้น ได้แก่ ความสว่างที่ฟลักซ์ของแสงตกตั้งฉากผิวเส้นประที่จุดนั้น

E_A แทนความสว่างของแสงที่จุด A บนพื้นราบ

θ แทนมุมที่เส้นตรงตั้งฉากกับพื้นราบทำกับฟลักซ์ของการส่องสว่าง

ตัวอย่างที่ 6.1 ตึกรูปทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เมตร มีหลอดไฟแขวนอยู่กึ่งกลางเพดาน จงหาความสูงของตึกถ้าความสว่างที่น้อยที่สุดของกำแพงมีค่าเป็น 2 เท่าของความสว่างที่น้อยที่สุดของพื้น

วิธีทำ เขียนรูปแสดงตำแหน่งของหลอดไฟและจุดที่หาความสว่าง



รูปที่ 6.3 ตำแหน่งของหลอดไฟและจุดที่หาความสว่าง

หาความสว่าง ณ จุดใด ๆ จากสูตร $E = \frac{I}{R^2} \cos \theta$

ความสว่างน้อยที่สุดที่กำแพง $E_A = \frac{I}{R^2} \cos \alpha$

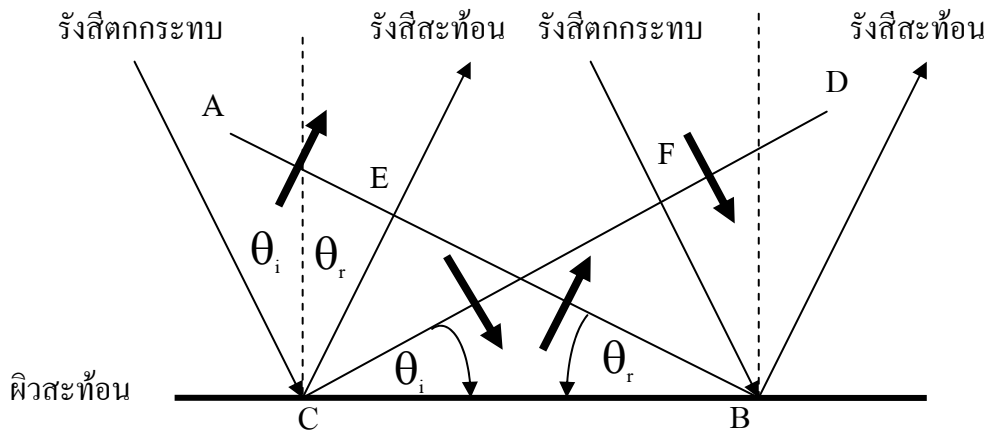
ความสว่างน้อยที่สุดที่พื้น $E_B = \frac{I}{R^2} \cos \beta$

จะได้ว่า $\frac{E_A}{E_B} = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$

จากโจทย์กำหนดให้ $\frac{E_A}{E_B} = 2$

จะได้ $2 = \frac{D}{2R} \times \frac{R}{h}$
 $h = 7.5$ เมตร

การสะท้อนของแสง

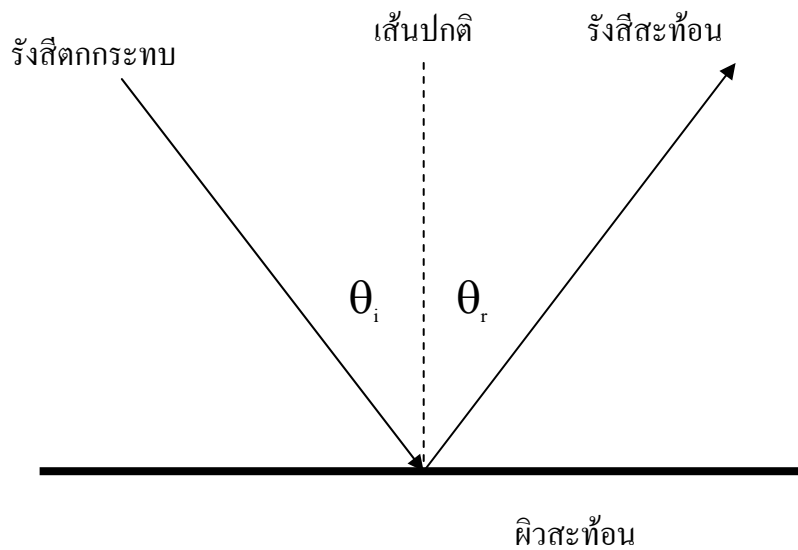


รูปที่ 6.4 คลื่นแสงตกกระทบและคลื่นแสงสะท้อน

เมื่อแสงตกกระทบพื้นผิวสะท้อน จะสะท้อนกลับสู่ตัวกลางเดิม พิจารณาน้ำคลื่น CD จะตกกระทบผิวสะท้อนเรียบ θ_i ทำให้เกิดน้ำคลื่นสะท้อน AB ตามหลักของฮอยเกนส์ และจะสะท้อนกลับทำมุม θ_r กับพื้นกระทบ และจาก $\triangle CBE$ และ $\triangle CBF$ ซึ่งเท่ากันทุกประการจะได้ว่า

$$\theta_i = \theta_r \quad (6.1)$$

เพื่อความสะดวกในการเขียนและการพิจารณา นิยมเขียนเส้นตรงแทนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสง และเรียกเส้นตรงนี้ว่า รังสีตกกระทบ และรังสีสะท้อน



รูปที่ 6.5 แสดงการสะท้อนของแสงโดยการเขียนรังสี

หลักการเกี่ยวกับการสะท้อนของแสง สรุปได้ดังนี้

1. รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นปกติ จะต้องอยู่บนระนาบเดียวกัน
2. มุมสะท้อน θ_i จะเท่ากับมุมตกกระทบ θ_r เสมอ นั่นคือ $\theta_i = \theta_r$

ภาพจริงและภาพเสมือน

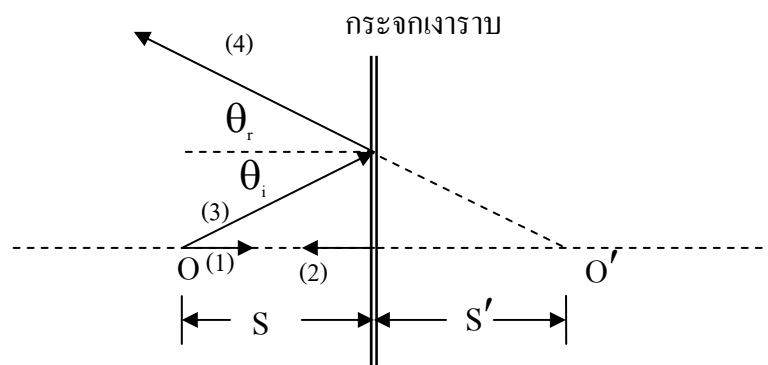
ภาพจริง (Real Image) คือ ภาพที่เกิดจากรังสีของแสงจากวัตถุได้เปลี่ยนทิศทางการเดิน โดยการสะท้อนไปตัดกันจริง ๆ ณ จุดที่เกิดภาพจริง ภาพจะมีลักษณะเป็นภาพหัวกลับกับวัตถุ สามารถใช้ฉากรับภาพได้

ภาพเสมือน (Virtual Image) คือ ภาพที่ไม่ได้เกิดจากรังสีของแสงไปตัดกันจริง ๆ แต่มีรังสีเสมือน ซึ่งเป็นแนวสมมุติที่ลากต่อจากแนวรังสีจริงไปตัดกัน ณ จุดที่เกิดภาพเสมือน สามารถมองเห็นได้ด้วยตา แต่ไม่สามารถใช้ฉากรับภาพได้

การเกิดภาพเนื่องจากการสะท้อนที่ผิวของกระจกเงาราบ

การเขียนภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกเงาราบ โดยใช้รังสีของแสง จะอาศัยหลักการสะท้อนของแสง

หาตำแหน่งของภาพที่เป็นจุด

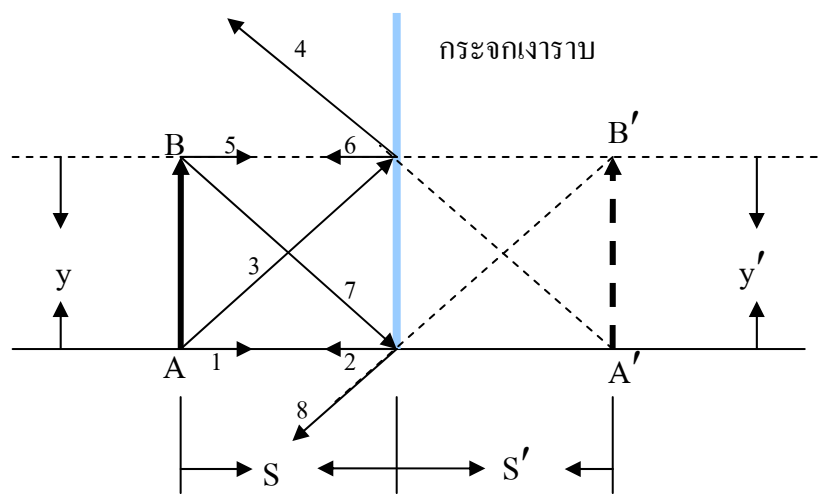


รูปที่ 6.6 แสดงการเกิดภาพของจุดเนื่องจากระจกเงาราบ

การเขียนภาพของจุดที่เกิดเนื่องจากกระจกเงาราบ

1. เขียนรังสีตกกระทบตั้งฉากกับผิวกระจก
2. เขียนรังสีสะท้อนกลับตามแนวเดิม จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก
3. เขียนรังสีตกกระทบทำมุม θ_i กับเส้นปกติ
4. เขียนรังสีสะท้อนกลับโดยให้มุมสะท้อน θ_r เท่ากับมุมตกกระทบ จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก จนตัดกันที่จุด O'

หาดำแหน่งภาพของวัตถุที่มีขนาดความสูง y



รูปที่ 6.7 แสดงการเกิดภาพของวัตถุเนื่องจากกระจกเงาราบ

การหาดำแหน่งภาพทำได้โดยพิจารณาขนาดของภาพโดยกำหนดให้เป็นจุดหัวท้าย จากนั้นพิจารณาเช่นเดียวกับภาพที่เกิดจากวัตถุที่เป็นจุดดังนี้

พิจารณาที่จุด A

1. เขียนรังสีตกกระทบตั้งฉากกับผิวกระจก
2. เขียนรังสีสะท้อนกลับตามแนวเดิม จากนั้น ลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก
3. เขียนรังสีตกกระทบทำมุม θ_i กับเส้นปกติ
4. เขียนรังสีสะท้อนกลับ โดยให้มุมสะท้อน θ_r เท่ากับมุมตกกระทบ จากนั้น ลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก จนตัดกันที่จุด P'

พิจารณาที่จุด B

5. เขียนรังสีตกกระทบตั้งฉากกับผิวกระจก
6. เขียนรังสีสะท้อนกลับตามแนวเดิม จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก

6. เขียนรังสีตกกระทบทำมุม θ_i กับเส้นปกติ

8. เขียนรังสีตกกระทบโดยให้มุมสะท้อน θ_r ทำกับมุมตกกระทบ จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก จนตัดกันที่จุด B'

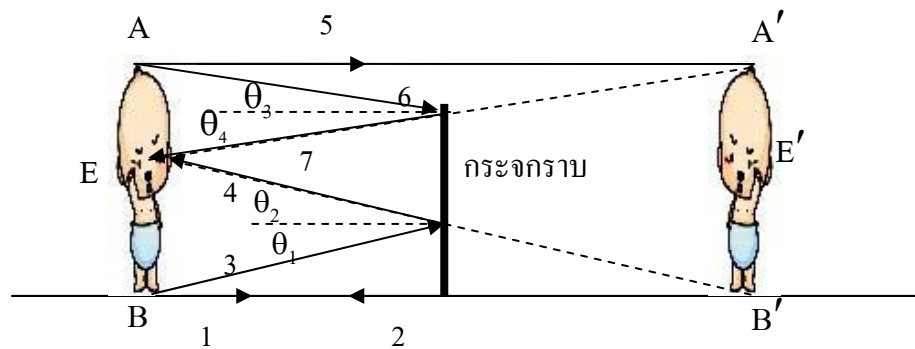
ลากเส้น $A'B'$ ก็ได้ภาพซึ่งสูง y' ตามต้องการ โดยทั่ว ๆ ไป การหาตำแหน่งของภาพมักใช้เพียงรังสี 1, 2, 5, 6, 7, 8 เท่านั้น

การสะท้อนบนเงาราบสรุปได้ว่า

ก. ระยะภาพ (s') เท่ากับระยะวัตถุ (s) ($s' = s$)

ข. ขนาดภาพ (y') เท่ากับขนาดวัตถุ (y) ($y' = y$)

การหาตำแหน่งภาพของวัตถุที่มีขนาดความสูง เมื่อกำหนดตำแหน่งตามาให้



รูปที่ 6.8 แสดงการเกิดภาพของวัตถุเนื่องจากกระจกเงาราบ

การหาตำแหน่งภาพทำได้โดยการกำหนดจุด ในที่นี้คือ A, B ส่วนตำแหน่งตาแทนด้วย E จากนั้นพิจารณา เช่นเดียวกับภาพที่เกิดจากวัตถุที่เป็นจุด โดยให้รังสีสะท้อนที่ทำมุมใด ๆ (ไม่เท่ากับ 90°) สะท้อนเข้าตา

พิจารณาที่จุด B

1. เขียนรังสีตกกระทบตั้งฉากกับผิวกระจก
2. เขียนรังสีสะท้อนกลับตามแนวเดิม จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก (ถ้าไม่มีกระจกให้ลากเฉพาะรังสีที่ 1 เท่านั้น เหมือนรังสีที่ 5)

3. เขียนรังสีตกกระทบทำมุม θ_1 กับเส้นปกติ

4. เขียนรังสีสะท้อนกลับโดยให้มุมสะท้อน θ_2 เท่ากับมุมตกกระทบ โดยรังสีสะท้อนจะต้องสะท้อนเข้าตา จากนั้น ลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก จนตัดกันที่จุด B'

พิจารณาที่จุด A

5. เขียนรังสีตกกระทบ (แต่เนื่องจากไม่มีกระจก)จึงให้ลากเลขกระจกไป (ถ้ามีกระจกให้พิจารณาเหมือนรังสีที่ 1 และ 2)
6. เขียนรังสีตกกระทบทำมุม θ_3 กับเส้นปกติ
7. เขียนรังสีสะท้อนกลับโดยให้มุมสะท้อน θ_4 เท่ากับมุมตกกระทบ โดยรังสีสะท้อนจะต้องสะท้อนเข้าตา จากนั้น ลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก จนตัดกันที่จุด $A' B'$ จะได้ภาพ

การเกิดภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกเงาโค้ง

กระจกเงาโค้งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ กระจกเว้า (Concave Mirrors) หรือกระจกนูน (Convex Mirrors)

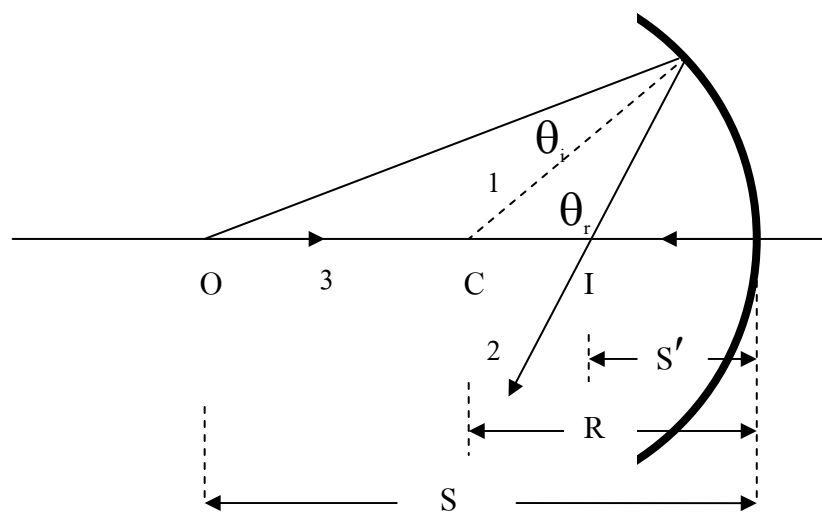
กระจกเว้า คือ กระจกเงาโค้งที่มีผิวสะท้อน รังสีตกกระทบ และรังสีสะท้อนอยู่ด้านเดียวกับจุดศูนย์กลางความโค้ง C

กระจกนูน คือ กระจกเงาโค้งที่มีผิวสะท้อน รังสีตกกระทบ และรังสีสะท้อนอยู่คนละด้านกับจุดศูนย์กลางความโค้ง

การหาตำแหน่งภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกเงาโค้ง โดยใช้เส้นรังสีและใช้กฎการสะท้อนแสง

หาตำแหน่งภาพที่เกิดจากกระจกโค้งในกรณีวัตถุเป็นจุด

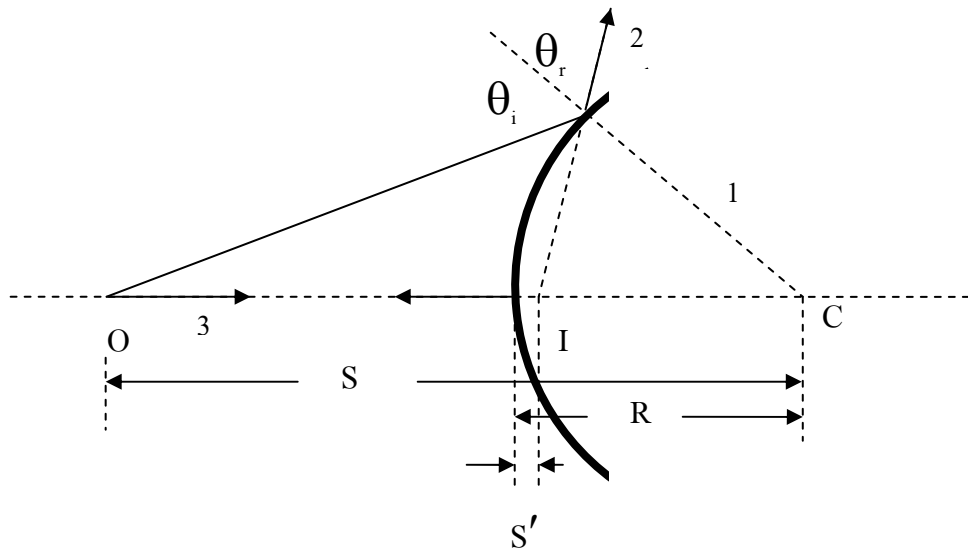
ภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกเว้า



รูปที่ 6.9 ภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกเว้า

1. ลากเส้นปกติให้ตั้งฉากกับผิวโค้ง โดยผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง C เสมอ
2. เขียนรังสีสะท้อนกลับ โดยให้มุมสะท้อนเท่ากับมุมตกกระทบ
3. รังสีที่ผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง C จะสะท้อนกลับทางเดิม รังสีสะท้อนจะตัดกัน และเกิดภาพ S' ที่ตำแหน่งรังสีสะท้อนตัดกัน

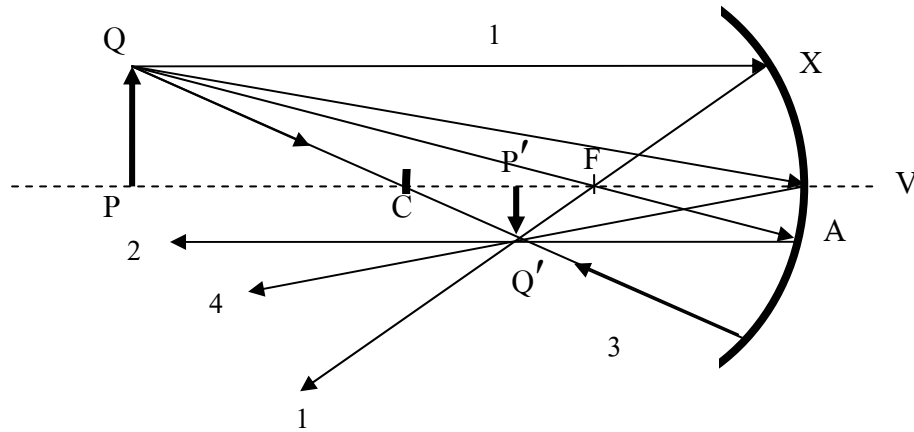
ภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกนูน



รูปที่ 6.10 ภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกนูน

1. ลากเส้นปกติให้ตั้งฉากกับผิวโค้ง โดยให้เส้นปกติผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง (C)
2. เขียนมุมสะท้อนกลับ เท่ากับมุมตกกระทบ จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังเลนส์
3. รังสีที่ผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง (C) จะสะท้อนกลับทางเดิม รังสีสะท้อนจะตัดกัน และเกิดภาพ (I) ที่ตำแหน่งรังสีสะท้อนตัดกัน

หาดำแหน่งภาพที่เกิดจากกระจกเว้า



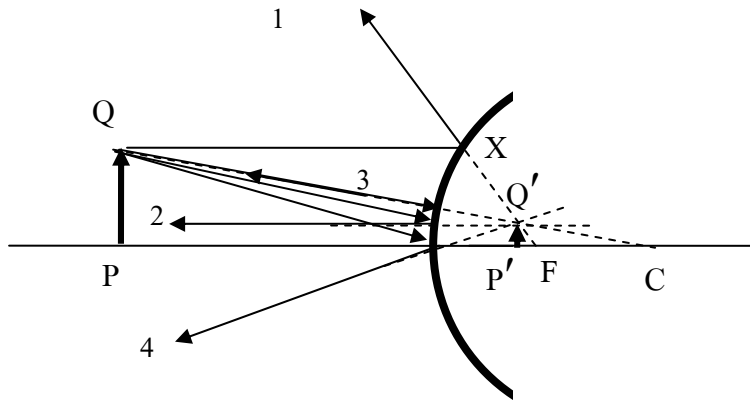
รูปที่ 6.11 หาดำแหน่งภาพที่เกิดจากกระจกเว้า

1. รังสีตกกระทบ (QX) ที่ขนานกับแกนหลัก (PV) เมื่อตกกระทบกระจกเว้า จะสะท้อนผ่านจุดโฟกัส F
2. รังสีตกกระทบจากจุดโฟกัส (QA) จะสะท้อนขนานกับแกนหลัก (PV)
3. รังสีผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง จะตั้งฉากกับกระจกโค้ง และสะท้อนกลับทางเดิม
4. รังสีตกกระทบถึงขั้วกระจก (PV) แล้วเขียนรังสีสะท้อนโดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน

รังสีสะท้อนตามขั้นตอนต่าง ๆ (1 ถึง 4) จะตัดกันที่จุดเดียวกันและเกิดภาพที่ตำแหน่งนั้น ดังนั้นการหาดำแหน่งภาพมักจะใช้เพียง 2 รังสี (ภายใน 4 ข้อ ดังกล่าว) ก็เป็นการเพียงพอ ภาพที่เกิดจากกระจกเว้า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

ตำแหน่งวัตถุ(S)	ตำแหน่งภาพ(S')	ลักษณะภาพ
1. $S = \infty$	$S' = f$	ภาพจริงเป็นจุดเล็กๆอยู่หน้ากระจก
2. $S > 2f$	$2f > S' > f$	ภาพจริงหัวกลับขนาดเล็กกว่าวัตถุ อยู่หน้ากระจก
3. $S = 2f$	$S' = 2f$	ภาพจริงหัวกลับขนาดเล็กเท่าวัตถุ อยู่หน้ากระจก
4. $2f > S > f$	$S' > 2f$	ภาพจริงหัวกลับขนาดใหญ่กว่าวัตถุ อยู่หน้ากระจก
5. $S = f$	$S' = \infty$	ระบุนิคมภาพไม่ได้ว่าอยู่หน้าหรือหลังกระจก ใหญ่กว่าวัตถุ
6. $S < f$	—	ภาพเสมือนหัวตั้งขนาดใหญ่กว่าวัตถุ อยู่หลังกระจก

หาดำแหน่งภาพที่เกิดจากกระจกนูน



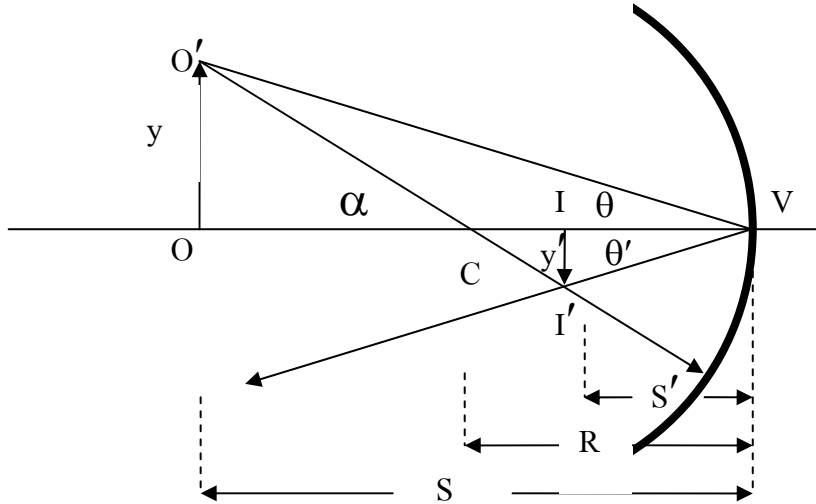
รูปที่ 6.12 การหาดำแหน่งภาพที่เกิดจากกระจกนูน

1. รังสีตกกระทบ (QX) ที่ขนานกับแกนหลัก (PV) เมื่อตกกระทบกระจกโค้ง จะสะท้อนที่ผิวโค้ง โดยที่มุมตกกระทบ กับมุมสะท้อน จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจกโค้ง โดยผ่านจุดโฟกัส
2. รังสีตกกระทบผ่านจุดโฟกัส จะสะท้อนขนานกับแกนหลัก จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังเลนส์
3. รังสีผ่านศูนย์กลางความโค้ง และสะท้อนกลับทางเดิม
4. รังสีตกกระทบถึงขั้วกระจก แล้วรังสีสะท้อน โดยที่มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน จากนั้นลากรังสีสะท้อนไปหลังกระจก

รังสีสะท้อนตามขั้นตอนต่าง ๆ (1 ถึง 4) จะตัดกันที่จุดเดียวกันและเกิดภาพที่ตำแหน่งนั้น ดังนั้นการหาดำแหน่งของภาพจึงมักจะใช้เพียง 2 รังสี (ภายใน 4 ข้อ ดังกล่าว) ก็เป็นการเพียงพอ ภาพที่เกิดจากกระจกนูน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

ตำแหน่งวัตถุ(S)	ตำแหน่งภาพ(S')	ลักษณะภาพ
1. $S = \infty$	$S' = f$	ภาพเสมือนเป็นจุดเล็กๆอยู่หลังวัตถุ
2. $S > 2f$	$S' < f$	ภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ อยู่หลังกระจก
3. $S = 2f$	$S' < f$	ภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ อยู่หลังกระจก
4. $2f > S > f$	$S' < f$	ภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ อยู่หลังกระจก
5. $S = f$	$S' < f$	ภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ อยู่หลังกระจก
6. $S < f$	$S' < f$	ภาพเสมือนขนาดเล็กกว่าวัตถุ อยู่หลังกระจก

สมการกระจกโค้ง



รูปที่ 6.13 การเกิดภาพของกระจกโค้ง

จากรูปกำหนดให้

- | | |
|----------------------------|-------------------------|
| S แทน ระยะวัตถุ | S' แทน ระยะภาพ |
| y แทน ความสูงวัตถุ | y' แทน ความสูงภาพ |
| θ แทน มุมตกกระทบ | θ' แทน มุมสะท้อน |
| C แทน จุดศูนย์กลางความโค้ง | R แทน รัศมี |
| V แทน จุดยอด | |

พิจารณา ΔIOC และ $\Delta I'O'C$ โดยใช้จุด V เป็นจุดอ้างอิงจะได้ว่า

$$\tan \alpha = \frac{y}{S-R} \quad \text{และ} \quad \tan \alpha = \frac{-y'}{R-S'}$$

จะได้
$$\frac{y'}{y} = \frac{-(R-S')}{(S-R)} \tag{6.2}$$

พิจารณา ΔIOC และ $\Delta I'O'V$ จะได้

$$\tan \theta = \frac{y}{S} \quad \text{และ} \quad \tan \theta' = -\frac{y'}{S'}$$

แต่
$$\theta = \theta'$$

ดังนั้น
$$\frac{y}{S} = -\frac{y'}{S'}$$

$$\text{หรือ } \frac{y'}{y} = -\frac{S'}{S} \quad (6.3)$$

แทนสมการ 6.3 ลงใน 6.2

$$\begin{aligned} \frac{S'}{S} &= \frac{-(R-S')}{(S-R)} \\ \frac{S-R}{S} &= \frac{R-S'}{S'} \\ 1 - \frac{R}{S} &= \frac{R}{S'} - 1 \\ \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} &= \frac{2}{R} \end{aligned} \quad (6.4)$$

ถ้า S อยู่ไกลมาก นั่นคือ $\frac{1}{S}$ จะเข้าใกล้ 0 ดังนั้นสมการที่ 6.4 เขียนใหม่ได้เป็น

$$S' = \frac{R}{2} \quad (6.5)$$

นั่นคือภาพของวัตถุที่อยู่ไกล ๆ จะเกิดขึ้นที่จุดกึ่งกลางระหว่างจุดยอดของกระจกเว้ากับจุดศูนย์กลางความโค้ง จุดนี้เรียกว่า จุดโฟกัส (f) นั่นคือ

$$f = \frac{R}{2} \quad (6.6)$$

แทนสมการที่ 6.6 ลงในสมการที่ 6.3 จะได้

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \quad (6.7)$$

สมการที่ 6.7 เรียกว่า สมการกระจกเงาโค้ง ซึ่งสมการนี้สามารถจัดเป็นรูปแบบต่าง ๆ ได้ ดังนี้

$$f = \frac{SS'}{S+S'}$$

$$S = \frac{fS'}{S'-f}$$

$$S' = \frac{fS}{S-f}$$

กำลังขยาย (m) ของกระจกเงาโค้งหาได้จากสมการ

$$m = \frac{y'}{y}$$

แต่จากสมการที่ 6.3 $\frac{y'}{y} = -\frac{S'}{S}$ ดังนั้น

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{S'}{S} = \frac{f-S'}{f} = \frac{-f}{S-f} \quad (6.8)$$

จากสมการกระจกเงาโค้ง และสมการกำลังขยาย สามารถใช้ได้ทั้งกระจกเงาเว้าและกระจกนูนโดยกำหนดเครื่องหมายของ

- ก. ระยะวัตถุ S เป็น + ถ้าวัตถุอยู่หน้ากระจก (เป็นวัตถุจริง)
 และ S เป็น - ถ้าวัตถุอยู่หลังกระจก (เป็นวัตถุเสมือน)
- ข. ระยะภาพ S' เป็น + ถ้าเป็นภาพจริงเกิดหน้ากระจก
 และ S' เป็น - ถ้าเป็นภาพเสมือนเกิดหลังกระจก

ความยาวโฟกัส f และรัศมีความโค้ง R เป็นบวก (+) สำหรับกระจกเว้า (จุด f และ C อยู่หน้ากระจก) แต่ f และ R จะเป็นลบ (-) สำหรับกระจกนูน (จุด f และ C อยู่หลังกระจก) ส่วนกำลังขยาย m เป็นบวก (+) ถ้าเกิดภาพหัวตั้ง และ m เป็นลบ (-) ถ้าเกิดภาพหัวกลับ

ตัวอย่างที่ 6.2 เมื่อวางวัตถุซึ่งสูง 10 เซนติเมตร หน้ากระจกทำให้เกิดภาพจริงสูง 3 เซนติเมตร และ

ระยะห่างวัตถุกับภาพเท่ากับ 120 เซนติเมตร ความยาวโฟกัสของกระจกนี้เป็นเท่าใด

วิธีทำ เนื่องจากเกิดภาพจริงขนาดเล็กกว่าวัตถุ แสดงว่ากระจกที่ใช้เป็นกระจกเว้า

โจทย์กำหนดให้ $y = 10$ cm, $y' = 3$ cm, $S = S' + 120$ cm

หาระยะภาพจากสูตร $\frac{y'}{y} = \frac{S'}{S}$

แทนค่า $\frac{3}{10} = \frac{S'}{S' + 120}$

$$3S' + 360 = 10S'$$

$$S' = \frac{360}{7} \text{ cm}$$

ดังนั้น $S = \frac{360}{7} + 120 = \frac{1200}{7} \text{ cm}$

หาความยาวโฟกัสจาก $\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'}$

$$\begin{aligned} \text{แทนค่า} \quad \frac{1}{f} &= \frac{1}{1200} + \frac{1}{360} = \frac{7}{1200} + \frac{7}{360} \\ &= \frac{7}{360} \\ f &= \frac{3600}{91} = 39.56 \text{ cm} \end{aligned}$$

กระจกนี้เป็นกระจกเว้ามีความยาวโฟกัสเท่ากับ 39.56 เซนติเมตร

ตัวอย่างที่ 6.3 เมื่อวางวัตถุซึ่งสูง 10 เซนติเมตร ไว้หน้ากระจกนูนซึ่งมีรัศมีความโค้ง 50 เซนติเมตร โดยวางห่างวัตถุห่างจากกระจกเป็นระยะ 100 เซนติเมตร จงหาความสูงของภาพ

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $y = 10 \text{ cm}$, $S = 100 \text{ cm}$, $R = -50 \text{ cm}$, $y' = ? \text{ cm}$,

$$\begin{aligned} \text{หาค่าตำแหน่งภาพจาก} \quad \frac{1}{f} &= \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \\ \text{แทนค่า} \quad \frac{1}{-25} &= \frac{1}{100} + \frac{1}{S'} \\ S' &= -20 \text{ cm} \end{aligned}$$

ระยะภาพเป็นลบแสดงว่าเป็นภาพเสมือนอยู่หลังกระจก

$$\begin{aligned} \text{หาความสูงของภาพจาก} \quad \frac{y'}{y} &= \frac{S'}{S} \\ \text{แทนค่า} \quad \frac{y'}{10} &= \frac{-20}{100} \\ y' &= -2 \text{ cm} \end{aligned}$$

ภาพที่ได้เป็นภาพเสมือน สูง 2 เซนติเมตร

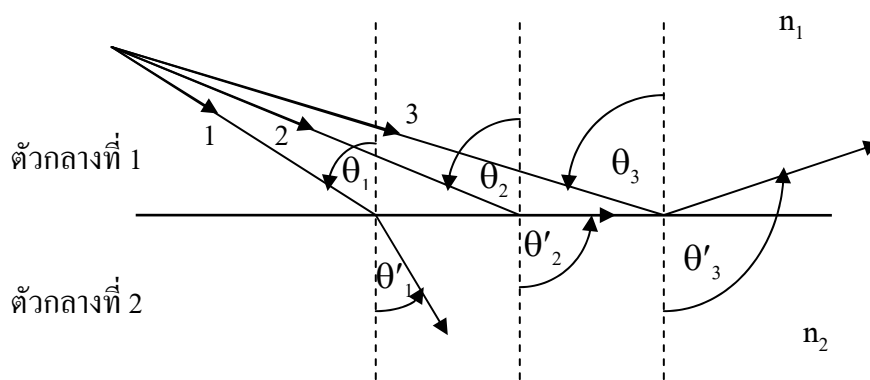
การสะท้อนกลับหมด

ถ้าคลื่นแสงเดินทางในตัวกลางหนึ่ง แล้วตกกระทบผิวตัวกลางหนึ่งที่มีดัชนีหักเหน้อยกว่า จะหักเหไปในตัวกลางที่สองด้วยมุมที่โตกว่ามุมตกกระทบ

มุมตกกระทบ θ ย่อมน้อยกว่า θ' จากรูปแสดงรังสีตกกระทบ 3 เส้น คือ เส้นที่ 1, 2 และ 3 ทำมุมตกกระทบ θ_1 , θ_2 และ θ_3 ตามลำดับ ส่วนมุม θ'_1, θ'_2 และ θ'_3 เป็นมุมหักเหของรังสีเส้นที่ 1, 2 และ 3 ในตัวกลางที่ 2 โดยที่ $n_1 > n_2$

ถ้ารังสีตกกระทบบนทำมุมยิ่งโต ก็จะไม่มีการส่งแสงเดินทางผ่านไปยังตัวกลางที่โปร่งกว่า รังสีตกเส้นที่ 2 ทำมุมตกกระทบบนโตกว่ารังสีตกเส้นที่ (1) ทำให้ลำแสงหักเหขนานไปกับผิว (ทำมุม $\theta'_2 = 90^\circ$) ส่วนรังสีตกเส้นที่ (3) ทำมุมตกกระทบบนโตกว่ารังสีตกเส้นที่ (2) ทำให้รังสีสะท้อนกลับมาในตัวกลางเดิม เพราะทำมุมหักเหเกิน 90° เรียกปรากฏการณ์ที่รังสีตกทำให้รังสีสะท้อนกลับมาในตัวกลางเดิมว่า การสะท้อนกลับหมด (Total Internal Reflection)

มุมตกกระทบบนซึ่งทำให้มุมหักเหเป็น 90° หรือทำให้แสงหักเหขนานกับผิวของตัวกลาง เรียกว่า มุมวิกฤติ (Critical angle, θ_c) ในรูปมุม θ_c คือมุม θ_2



รูปที่ 6.14 แสดงการสะท้อนกลับหมด เมื่อ $n_1 > n_2$

จากกฎของสเนล

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ$$

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \tag{6.9}$$

ตัวอย่างที่ 6.4 ถ้าดัชนีหักเหของเพชรและแก้วเท่ากับ $\frac{5}{2}$ และ $\frac{3}{2}$ ตามลำดับ จงหามุมวิกฤตระหว่าง

เพชรและแก้ว

วิธีทำ มุมวิกฤตจะเกิดเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหของแสงจากมากไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่า ดังนั้นกรณีนี้แสงต้องเคลื่อนที่จากเพชรไปแก้ว

$$\text{จากกฎของสเนลล์ } \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{3}{2}}{\frac{5}{2}} = \frac{3}{5}$$

$$\text{ดังนั้น } \theta_c = \sin^{-1} 0.6 \text{ หรือ } 37^\circ$$

การหักเหของแสง

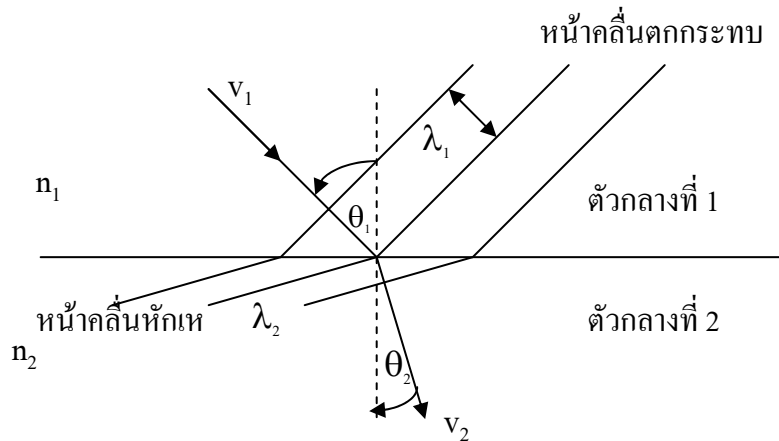
การหักเหของแสงผ่านผิวย่อต่อราบ

เมื่อคลื่นแสงเคลื่อนที่อยู่ในตัวกลางโปร่งแสง (Transparent medium) ชนิดหนึ่ง แล้วมากระทบตัวกลางโปร่งแสงอีกชนิดหนึ่ง ซึ่งมีดัชนีหักเหต่างกัน คลื่นจะเคลื่อนที่ต่อไปในตัวกลางที่สองด้วยความเร็ว (c) ที่ไม่เท่าเดิม ทำให้ความยาวคลื่น (λ) เปลี่ยนไป แต่ความถี่ (f) ยังเท่าเดิมนอกจากนั้น มุมของหน้าคลื่นที่กระทำต่อผิวต่อระหว่างตัวกลางทั้งสองก็เปลี่ยนไป จึงเรียกคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางที่สองนี้ว่าคลื่นหักเห

ปริมาณที่ใช้เปรียบเทียบอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ (v) กับอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศ (c) คือดัชนีหักเหของตัวกลาง เมื่อ

$$n = \frac{\text{อัตราเร็วแสงในสุญญากาศ}}{\text{อัตราเร็วแสงในตัวกลางใด ๆ}} = \frac{c}{v} \quad (6.10)$$

เนื่องจาก $n > 1$ เสมอ แสดงว่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ จะมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็วแสงในสุญญากาศเสมอ



รูปที่ 6.15 แสดงว่าอัตราเร็วของแสงในตัวกลางใด ๆ จะมีค่าน้อยกว่าอัตราเร็วแสงในสุญญากาศ

จาก $n = \frac{c}{v}$

$$n_1 = \frac{c}{v_1}, n_2 = \frac{c}{v_2} \quad (6.11)$$

จากกฎ $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (6.12)$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

หรือ $n_1 v_1 = n_2 v_2$

แต่ $v = f\lambda$

$$n_1 \lambda_1 f_1 = n_2 \lambda_2 f_2 \text{ (ความถี่แสงคงที่)}$$

$$n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2 \quad (6.13)$$

ตัวอย่างที่ 6.5 แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 700 nm ในสุญญากาศ เมื่ออยู่ในแก้วซึ่งมีดัชนีหักเห

1.5 จงหาความยาวคลื่น ความถี่ และความเร็วของคลื่น

วิธีทำ หาความยาวคลื่นจาก $n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$

$$1(700\text{nm}) = 1.5\lambda_2$$

$$\lambda_2 = \frac{700\text{nm}}{1.5} = 466.67\text{nm}$$

∴ ความยาวคลื่นในแก้ว เท่ากับ 466.67nm

$$1(3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.5(v_2)$$

$$v_2 = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\therefore \text{ความเร็ว} = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

หาความถี่จาก $c = f\lambda$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{700 \times 10^{-9} \text{ m}}$$

$$= \frac{3}{7 \times 10^5} \text{ Hz} = 4.3 \times 10^5 \text{ Hz}$$

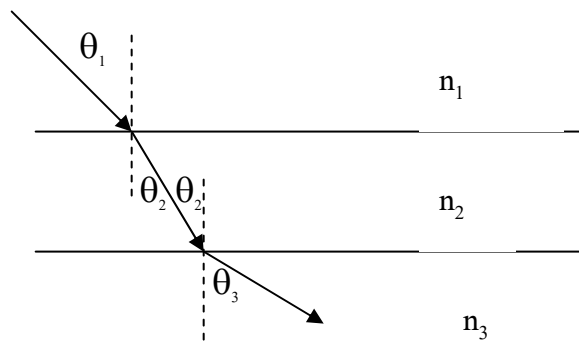
$$\therefore \text{ความถี่ของคลื่นแสง} = 4.3 \times 10^5 \text{ Hz}$$

หาความเร็วจาก $n_1 v_1 = n_2 v_2$

$$1(3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 1.5(v_2) \quad : \quad v_2 = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$\therefore \text{ความเร็ว} = 2 \times 10^8 \text{ m/s}$$

ตัวอย่างที่ 6.6 จากรูปจงหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\sin \theta_1$ และ $\sin \theta_3$ เมื่อแสงผ่านชั้นหนา สม่ำเสมอของสารและผิวของชั้นขนานกัน



รูปที่ 6.16 แสดงการหักเหของแสงผ่านตัวกลาง 3 ตัว

วิธีทำ จากกฎของสเนล

$$\text{ที่ผิวบนจะได้} \quad \sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1 \quad (1)$$

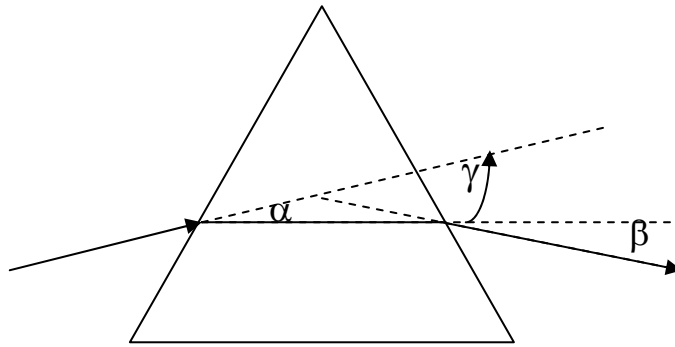
$$\sin \theta_3 = \frac{n_2}{n_3} \sin \theta_2 \quad (2)$$

แทนค่า $\sin \theta_2$ จาก (1) ลงใน (2)

$$\sin \theta_3 = \frac{n_1}{n_3} \sin \theta_1$$

$$n_1 \sin \theta_1 = n_3 \sin \theta_3$$

การหักเหของแสงที่ผ่านปริซึม



รูปที่ 6.17 แสงผ่านปริซึมจะบ่ายเบนเป็นมุม γ

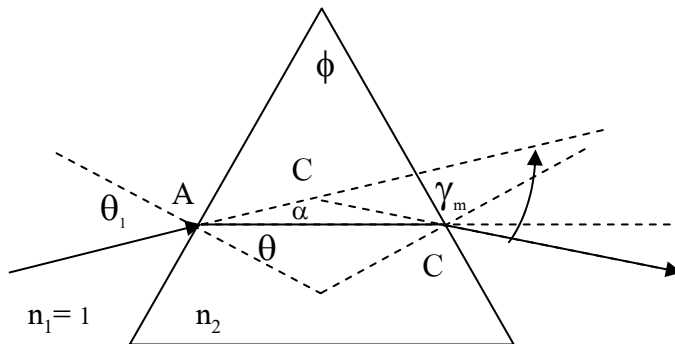
พิจารณาปริซึม แสงหักเหผ่านปริซึมจะบ่ายเบนจากแนวรังสีเดิม α และเมื่อออกสู่อากาศ จะบ่ายเบนจากแนวรังสีเดิม β ดังนั้นค่ามุมเบี่ยงเบนทั้งหมด (γ) จะมีค่าดังนี้

$$\gamma = \alpha + \beta \quad (6.14)$$

โดยที่ γ จะขึ้นอยู่กับค่าดัชนีหักเหของปริซึม และมุมตกกระทบของแสงเดิม

ตัวอย่างที่ 6.7 จากรูป ขณะที่รังสีซึ่งตกกระทบปริซึมแท่งหนึ่ง มีผลทำให้มุมตกกระทบมีค่าลดลง ๆ มุมเบี่ยงเบน (γ) ที่สอดคล้องกันจะลดลง ๆ แล้วจึงเพิ่มขึ้น ๆ ปรากฏว่ารังสีที่หักเหในปริซึมแท่งนั้นขนานกับฐานของปริซึมแท่งดังกล่าวนี้ จะเกิดกรณีของมุม

$$\text{เบี่ยงเบนน้อยสุด } (\gamma_m) \text{ จงแสดงว่า } n_2 = \frac{\sin\left(\frac{\gamma + \phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$



รูปที่ 6.18 เมื่อแสงผ่านปริซึมกรณีที่มีมุมตกกระทบลดลง

พิจารณาจากกฎของสเนล

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

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

$$n_2 = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta} \quad (n_1 \text{ แทนดัชนีหักเหของอากาศมีค่าเท่ากับ 1})$$

พิจารณา $\triangle ABC$

$$\phi + 2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \pi$$

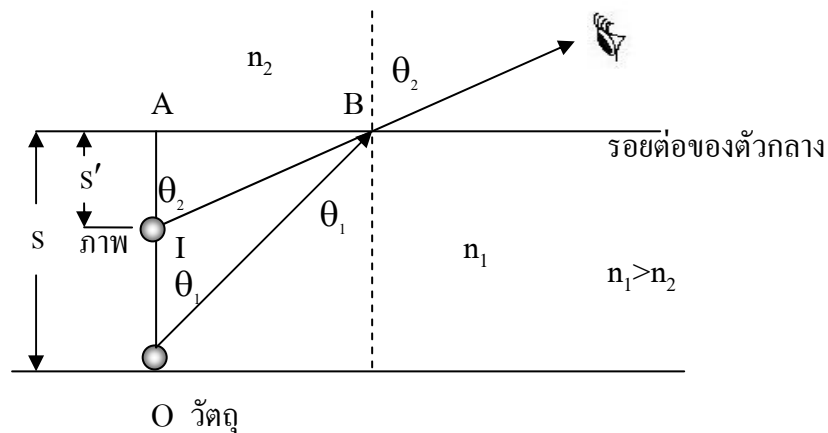
$$\theta_1 = \alpha + \theta$$

$$= \frac{\gamma}{2} + \frac{\phi}{2}$$

แต่ $n_2 = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta}$

$$n_2 = \frac{\sin\left(\frac{\gamma + \phi}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

ความลึกปรากฏ



รูปที่ 6.18 ภาพลึกลับจริงลึกลับปรากฏ

จากกฎของสเนล

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

$$n_1 \frac{AB}{OB} = n_2 \frac{AB}{IB}$$

$$\frac{n_1}{OB} = \frac{n_2}{IB} \tag{6.15}$$

แต่ $IB = \frac{S'}{\cos \theta_2}$ (6.16)

$$OB = \frac{S}{\cos \theta_1} \tag{6.17}$$

แทนสมการที่ 6.16 และ 6.17 ลงในสมการที่ 6.15

$$\frac{n_1 \cos \theta_1}{S} = \frac{n_2 \cos \theta_2}{S'}$$

$$\frac{S'}{S} = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1} \tag{6.18}$$

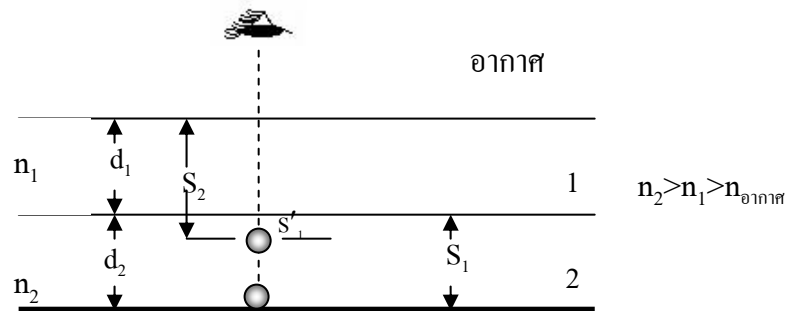
ในกรณีมองตรง ๆ จะได้ ($\theta_1 = \theta_2 = 0^\circ$)

ดังนั้น $\cos \theta_1 = \cos \theta_2 = 1$

$$\frac{S'}{S} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{ลึกปรากฏ}}{\text{ลึกจริง}} \tag{6.19}$$

เมื่อ n_1 แทนดัชนีหักเหในตัวกลางที่ 1 หรือตัวกลางที่วัตถุอยู่
 n_2 แทนดัชนีหักเหในตัวกลางที่ 2 หรือตัวกลางที่ผู้สังเกตอยู่

กรณีมองผ่านตรงของเหลว 2 ชนิดที่มีความหนาแต่ละชั้น d_1 และ d_2 ดังรูปที่ 6.19



รูปที่ 6.19 ภาพที่เกิดจากการหักเหที่ผิวราบกรณีมองผ่านตรงของเหลว 2 ชนิด

การพิจารณาให้พิจารณาแต่ละชั้น โดยพิจารณาจากชั้นล่างก่อนพิจารณาที่ผิวที่ 1 และ 2

$$\frac{S'}{S} = \frac{n_1}{n_2}$$

$$S'_1 = \frac{S_1 n_1}{n_2}$$

$$= \frac{d_2 n_1}{n_2}$$

พิจารณาที่ผิว 1 และอากาศ

$$\frac{S'_2}{S_2} = \frac{n_{\text{อากาศ}}}{n_1} = \frac{1}{n_1}$$

$$S'_2 = \frac{S_2}{n_1}$$

แต่ $S_2 = d_1 + S'_1$

$$S'_2 = \frac{d_1 + \frac{d_2 n_1}{n_2}}{n_1}$$

$$S'_2 = \frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2} \quad (6.20)$$

โดยระยะปรากฏจะวัดจากผิวบนสุด

ตัวอย่างที่ 6.8 ถ้วยแก้วมีก้นหนา 1.35 เซนติเมตร บรรจุน้ำสูง 4 เซนติเมตร วางทับวัตถุชิ้นเล็ก ๆ ชั้นหนึ่ง ถ้ามองวัตถุนี้จากด้านบนของถ้วยจะเห็นวัตถุอยู่ลึกจากผิวน้ำเท่าใด ถ้าดัชนีหักเหของแก้วและน้ำเท่ากับ $\frac{3}{2}$ และ $\frac{4}{3}$ ตามลำดับ

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $d_1 = 1.35$ cm, $d_2 = 4$ cm, $n_1 = \frac{3}{2}$ และ $n_2 = \frac{4}{3}$

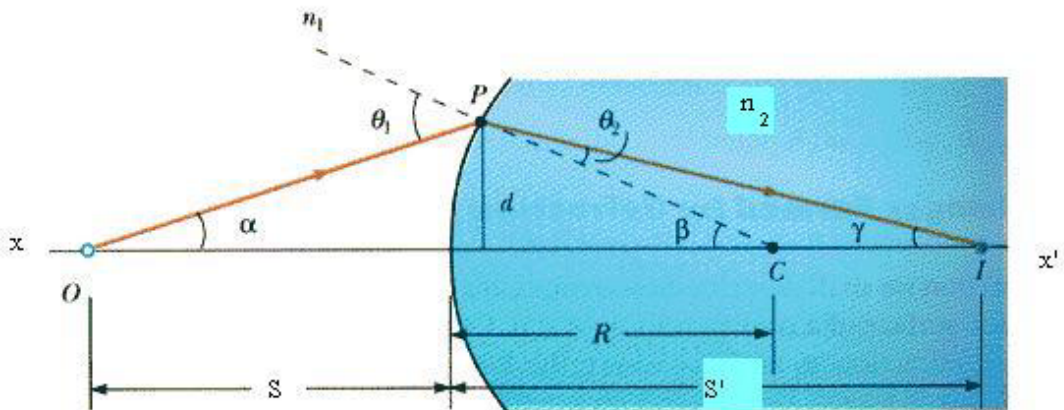
จากสูตร $S'_2 = \frac{d_1}{n_1} + \frac{d_2}{n_2}$

$$\text{แทนค่า } S'_2 = \frac{1.35}{\frac{3}{2}} + \frac{4}{\frac{4}{3}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1.35}{1.5} + 3 \\
 &= 3.9 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

ถ้ามองวัตถุนี้จากด้านบนของถ้วยจะเห็นวัตถุอยู่ลึกจากผิวน้ำเท่ากับ 3.9 เซนติเมตร

การเกิดภาพเนื่องจากการหักเหที่ผิวโค้ง



รูปที่ 6.20 ภาพที่เกิดจากการหักเหที่ผิวโค้ง

จากรูป ถ้า O เป็นวัตถุซึ่งอยู่บนแกน xx' ที่ลากจากจุดศูนย์กลางความโค้ง C การหักเหของแสงบนผิวโค้ง มีลักษณะดังนี้

1. ลากรังสี α ทำมุมน้อย ๆ ซึ่งอยู่บนแกน xx' ไปตกกระทบพื้นผิวโค้งของทรงกลมที่จุด P ทำมุมตกกระทบ θ_1 กับเส้นปกติที่มาจากจุด C (เส้นปกติทำมุม β กับแกน xx')
2. ลากรังสีหักเหทำมุม θ_2 กับเส้นปกติ ไปตัดกันแกน xx' ที่จุด I ซึ่งเป็นตำแหน่งของภาพ โดยที่รังสีหักเหทำมุม γ กับแกน xx'

จากกฎของสเนล

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

จากรูปพิจารณา $\triangle COP$ จะได้

$$\theta_1 = \alpha + \beta$$

และพิจารณา $\triangle CIP$ จะได้

$$\beta = \theta_2 + \gamma$$

$$\theta_2 = \beta - \alpha$$

$$\text{แต่ } \tan \alpha = \frac{d}{S} : \tan \beta = \frac{d}{R} : \tan \gamma = \frac{d}{S'}$$

เนื่องจากมุมมีขนาดเล็กมากๆ จะได้ $\sin \theta \approx \tan \theta$ และ $\sin \theta_1 \approx \theta_1 : \sin \theta_2 \approx \theta_2$ จากกฎของสเนล จะได้

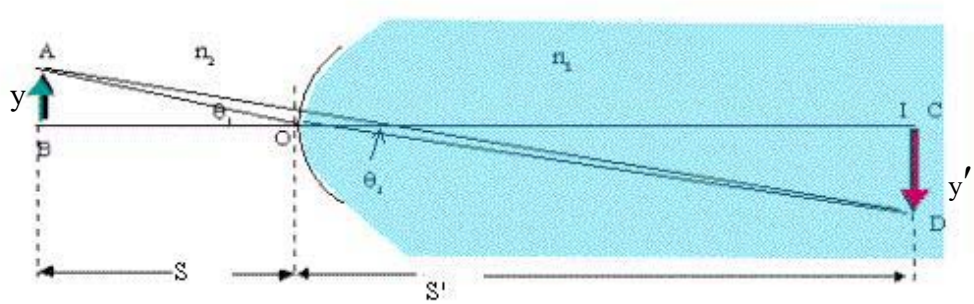
$$\begin{aligned} n_1 \theta_1 &= n_2 \theta_2 \\ n_1 (\alpha + \beta) &= n_2 (\beta - \gamma) \\ n_1 \left(\frac{d}{S} + \frac{d}{R} \right) &= n_2 \left(\frac{d}{S} - \frac{d}{R} \right) \\ n_1 \left(\frac{d}{S} + \frac{d}{R} \right) &= n_2 \left(\frac{d}{R} - \frac{d}{S'} \right) \\ \frac{n_1 d}{S} + \frac{n_2 d}{S'} &= \frac{n_2 d}{R} - \frac{n_1 d}{R} \\ \frac{n_1}{S} + \frac{n_2}{S'} &= \frac{n_2 - n_1}{R} \end{aligned} \tag{6.21}$$

สมการที่ 6.21 ใช้ได้กับผิวที่หักเหทั่วไปทั้งผิวนูน ผิวเว้า หรือผิวระนาบ โดยกำหนดเครื่องหมายดังนี้

1. ระยะวัตถุ S เป็นบวก (+) ถ้าเป็นวัตถุจริง และ S เป็นลบ (-) ถ้าเป็นวัตถุเสมือนอยู่หลังผิวหักเห
2. ระยะภาพ S' เป็นบวก (+) ถ้าเป็นภาพจริง และ S' เป็นลบ (-) ถ้าเป็นภาพเสมือนอยู่หลังผิวหักเห
3. รัศมีความโค้ง R เป็น (+) ถ้าหันผิวนูนเข้าหาวัตถุ และ R เป็นลบ (-) ถ้าหันผิวเว้าเข้าหาวัตถุ

กำลังขยายของภาพ

จากรูปที่ 6.21 เมื่อวางวัตถุ AB สูง y หน้าผิวหักเหที่เป็นผิวโค้งจะเกิดภาพจริงหัวกลับ CD สูง y'



รูปที่ 6.21 ภาพจริงที่เกิดจากการหักเหที่ผิวโค้ง

จากกฎของสเนล

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

เนื่องจาก θ_1 และ θ_2 เป็นมุมเล็ก ๆ จะได้ $\sin \theta_1 \approx \tan \theta_1$ และ

$$\sin \theta_2 \approx \tan \theta_2$$

$$n_1 \left(\frac{y}{s} \right) = n_2 \left(\frac{-y'}{s'} \right) = m \tag{6.22}$$

ถ้า m เป็นบวก (+) แสดงว่าเป็นภาพหัวตั้ง ถ้า m เป็นลบ (-) แสดงว่าเป็นภาพหัวกลับ

ตัวอย่างที่ 6.9 จากรูป 6.21 กำหนดให้ $n_1 = 1, n_2 = 2$ รัศมีความโค้ง $R = 0.1$ เมตร จงหา

ตำแหน่งภาพของวัตถุ AB ซึ่งอยู่ห่างจาก O เป็นระยะ 0.2 เมตร

วิธีทำ เนื่องจากใช้ผิวโค้งนูนรับแสง จากสมการ 6.21

$$\frac{n_1}{s} + \frac{n_2}{s'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

แทนค่าจะได้ว่า $\frac{1}{0.2} + \frac{2}{s'} = \frac{2-1}{0.1}$

$$s' = 0.40 \text{ เมตร}$$

ตำแหน่งภาพของวัตถุ AB อยู่ห่างจาก O เป็นระยะ 0.40 เมตร

เลนส์บาง

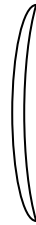
เลนส์บางแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เลนส์นูน หรือเลนส์รวมแสง (Convex Lens) และ เลนส์เว้าหรือเลนส์กระจายแสง (Concave Lens) ดังรูป



เลนส์นูนสองหน้า



เลนส์นูนแฉกระนาบ



เลนส์นูนแฉกเว้า



เลนส์เว้าสองหน้า



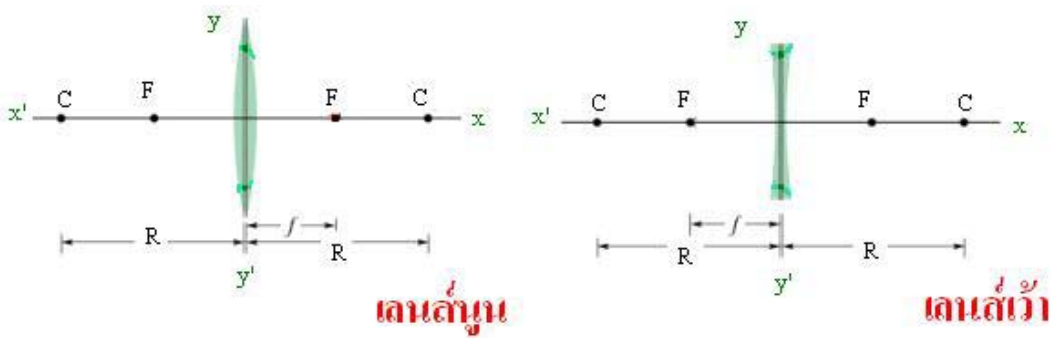
เลนส์เว้าแฉกระนาบ



เลนส์เว้าแฉกนูน

รูปที่ 6.22 แสดงรูปแบบของเลนส์แบบต่าง ๆ

องค์ประกอบของเลนส์บาง

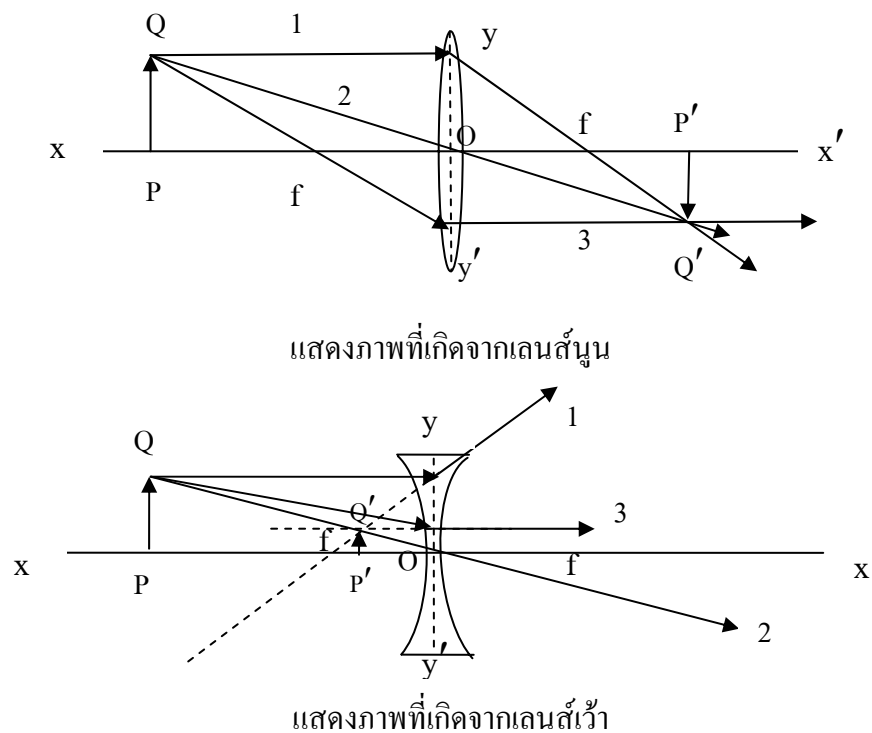


รูปที่ 6.23 องค์ประกอบของเลนส์บาง

องค์ประกอบของเลนส์บางแบ่งออกได้ ดังนี้

1. จุดศูนย์กลางความโค้ง (C) มี 2 จุด
2. แกนหลัก (xx') เส้นตรงซึ่งเชื่อมระหว่างจุดศูนย์กลางความโค้ง
3. ระนาบหลัก (yy') คือตำแหน่งที่เกิดการเบี่ยงเบนของรังสี
4. จุดศูนย์กลางเลนส์ (O) คือระยะที่แกนหลัก (xx') ตัดกับระนาบหลัก (yy') เป็นจุดที่อยู่ตรงกลางเลนส์ เมื่อรังสีทุกรังสีหักเหอยู่ในเลนส์ เมื่อผ่านจุดนี้แล้ว รังสีหักเหออกจากเลนส์จะขนานกับรังสีที่ตกกระทบเลนส์
5. จุดโฟกัส (F) คือจุดตัดร่วมของรังสีหักเหที่เกิดจากรังสีตกกระทบขนาน และขนานกับแกนหลัก โดยที่จุดโฟกัสของเลนส์นูน จะอยู่บนแกนหลัก ทางด้านตรงข้ามกับรังสีตกกระทบ จุดโฟกัสของเลนส์เว้าจะอยู่บนแกนหลักด้านเดียวกับรังสีตกกระทบ
6. ความยาวโฟกัส (f) คือระยะจากจุดโฟกัสถึงจุดศูนย์กลางเลนส์ (O)
7. รัศมีความโค้ง (R) คือระยะจากจุดศูนย์กลางความโค้ง (C) ถึงผิวโค้งของเลนส์

การหาตำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์บางโดยใช้รังสีของแสง

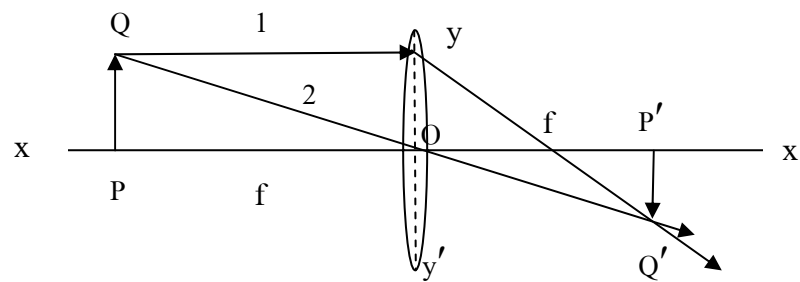


รูปที่ 6.24 แสดงภาพที่เกิดจากเลนส์

1. รังสีตกกระทบขนานกับแกนหลัก (xx') เมื่อกระทบเลนส์ ที่ระนาบหลัก (yy') แล้วจะหักเหเข้าสู่จุดโฟกัสของเลนส์รวมแสง (f) หรือ เสมือนมาจากจุดโฟกัสของเลนส์กระจายแสง (f)
2. รังสีตกกระทบที่ผ่านจุดกึ่งกลางของเลนส์ (O) จะมีแนวเป็นเส้นตรงไม่เบี่ยงเบน
3. รังสีตกกระทบที่ลากผ่านจุดโฟกัสของเลนส์ จะหักเหออกจากเลนส์ในแนวขนานกับแกนหลัก (xx')

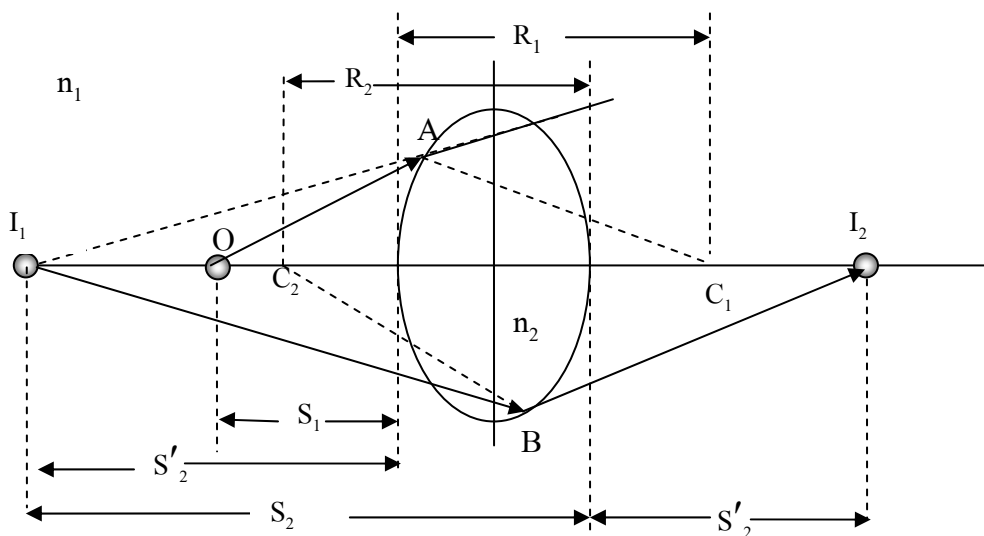
จุดตัดของรังสีหลักทั้งสาม จะแสดงตำแหน่งของภาพจริง ที่เกิดขึ้น (ภาพที่เกิดจากเลนส์นูน) แต่ถ้ารังสีหักเหจากเลนส์กางออกจุดตัดของแนวรังสีที่ต่อย้อนกลับ (ภาพที่เกิดจากเลนส์เว้า) จะแสดงตำแหน่งของภาพเสมือน

โดยทั่วไป การเขียนเส้นรังสีเพื่อหาดำแหน่งภาพ มักใช้เส้นรังสีหลักเพียง 2 เส้นแรก (ข้อ 1 และ 2) เท่านั้น ดังรูป



รูปที่ 6.25 แสดงการเขียนเส้นรังสีเพื่อหาดำแหน่งภาพ

การคำนวณการหักเหของแสงผ่านเลนส์บาง



รูปที่ 6.26 แสดงการหักเหของแสงผ่านเลนส์บาง

วางวัตถุ O อยู่ใกล้ตัวกลาง ดัชนีหักเห n_1 ไว้หน้าเลนส์บางดัชนีหักเห n_2 โดยวางห่างจากผิวแรกซึ่งมีรัศมีความโค้ง R_1 เป็นระยะทาง S_1 เกิดการหักเหที่จุด A ทำให้เกิดภาพเสมือน I_1 ซึ่งอยู่ห่างจากผิวแรกเป็นระยะทาง S'_1 ภาพ I_1 จากผิวแรกทำหน้าที่เป็นวัตถุให้ผิวที่สอง มีรัศมีความโค้ง R_2 เป็นระยะทาง S_2 เกิดการหักเหที่จุด B ทำให้เกิดภาพจริง I_2 ที่ระยะ S'_2 จากผิวที่สอง

หักเหครั้งแรกที่จุด A

$$\frac{n_1}{S_1} + \frac{n_2}{S'_1} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} \quad (6.23)$$

หักเหครั้งที่ 2 ที่จุด B

เมื่อผิวที่สองเป็นผิวเว้า ดังนั้น จึงแทน R_2 เป็นลบ (-) และระยะวัตถุเป็นวัตถุเสมือนจึงแทน S_2 เป็นลบ (-) เนื่องจากเป็นเลนส์บางความหนาแน่นน้อยมาก $S'_1 \approx S_2$

$$\begin{aligned} \frac{n_2}{-S_2} + \frac{n_1}{S'_1} &= \frac{n_1 - n_2}{-R_2} \\ -\frac{n_2}{S_2} + \frac{n_1}{S'_1} &= \frac{n_1 - n_2}{-R_2} \end{aligned} \quad (6.24)$$

นำสมการที่ 6.23 รวมกับ 6.24

$$\begin{aligned} \frac{n_1}{S_1} + \frac{n_1}{S'_1} &= \frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_2 - n_1}{R_2} \\ n_1 \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S'_1} &= (n_2 - n_1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \\ \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S'_1} &= \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \end{aligned} \quad (6.25)$$

เมื่อวัตถุอยู่ไกลมาก ($S = \infty$) ภาพจะเกิดที่จุดโฟกัส $S' = f$ จะได้

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.26)$$

กรณีเลนส์บางวางอยู่ในอากาศ ($n_1 = 1$) จะได้

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (6.27)$$

เมื่อ n คือดัชนีหักเหของเลนส์บาง สมการนี้เรียกว่า สมการของช่างทำเลนส์

เนื่องจากสมการที่ 6.26 เท่ากับ 6.27 จะได้สมการของเลนส์บาง คือ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \quad (6.28)$$

การใช้สมการ 6.25, 6.26 หรือ 6.27 กำหนดเครื่องหมายดังนี้

1. ระยะวัตถุ S เป็นบวก (+) ถ้าเป็นวัตถุจริง อยู่หน้าเลนส์
และ S เป็นลบ (-) ถ้าเป็นวัตถุเสมือน อยู่หลังเลนส์
2. ระยะภาพ S' เป็นบวก (+) ถ้าเป็นภาพจริง เกิดหลังเลนส์
และ S' เป็นลบ (-) ถ้าเป็นภาพเสมือน เกิดหน้าเลนส์
3. ความยาวโฟกัส (f) เป็นบวก (+) ถ้าเป็นเลนส์รวมแสง
และ (f) เป็นลบ (-) ถ้าเป็นเลนส์กระจายแสง
4. รัศมีความโค้ง R เป็นบวก (+) ถ้าหันส่วนนูนเข้าหาวัตถุ
และ R เป็นลบ (-) ถ้าหันส่วนเว้าเข้าหาวัตถุ

กำลังขยาย

กำลังขยายของเลนส์ m คือ อัตราส่วนของภาพ y' ต่อขนาดวัตถุ y สำหรับการหักเหสองครั้ง ถ้า m_1 และ m_2 เป็นกำลังขยายของผิวโค้งแรกและผิวโค้งที่สอง ตามลำดับ จะได้

$$m = \frac{y'}{y} = m_1 m_2 \quad (6.29)$$

$$\text{เมื่อ } m_1 = -\frac{n_1}{n_2} \left(\frac{S'_1}{S_1} \right)$$

$$m_2 = -\frac{n_2}{n_1} \left(\frac{S'_2}{-S_2} \right)$$

เนื่องจาก $S'_1 \approx S_2$ เนื่องจากเป็นระยะภาพเสมือน $S_2 = -S'_2 = -S'_1$

$$m_2 = -\frac{n_2}{n_1} \left(\frac{S'_2}{-S_1} \right)$$

$$m = \left(-\frac{n_1}{n_2} \right) \left(\frac{S'_1}{S_1} \right) \left(-\frac{n_2}{n_1} \right) \left(\frac{S'_2}{-S_1} \right)$$

$$= \left(-\frac{S'_2}{S_1} \right) \text{ หรือ } m = -\frac{S'}{S} \quad (6.30)$$

ถ้า S' เป็นลบ (-) จะได้ภาพเสมือนเกิดหน้าเลนส์ m จะเป็นบวก (+) แสดงว่าเป็นภาพหัวตั้ง

ถ้า S' เป็นบวก (+) จะได้ภาพจริง (เกิดจากรังสีหักเหตัดกันจริง) เกิดหลังเลนส์ m จะเป็นลบ (-) แสดงว่าเป็นภาพหัวกลับ

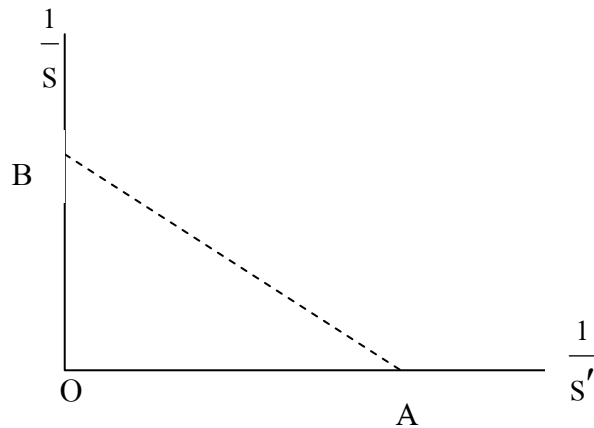
การหาความยาวโฟกัสของเลนส์

เลนส์นูน อาจหาค่าความยาวโฟกัส โดยวิธี

ก. การใช้สมการ $\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$

ทำการทดลองหาดำแหน่งของภาพ (S') เมื่อวัตถุอยู่หน้าเลนส์ ห่างจากเลนส์ (S) ระยะ

ต่าง ๆ กัน นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{S}$ กับ $\frac{1}{S'}$ แล้ววิเคราะห์



รูปที่ 6.27 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{1}{S}$ กับ $\frac{1}{S'}$

เมื่อ $\frac{1}{S} = 0$

$$\frac{1}{S'} = OA = \frac{1}{f}$$

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

เมื่อ $\frac{1}{S'} = 0$

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{f} = OB$$

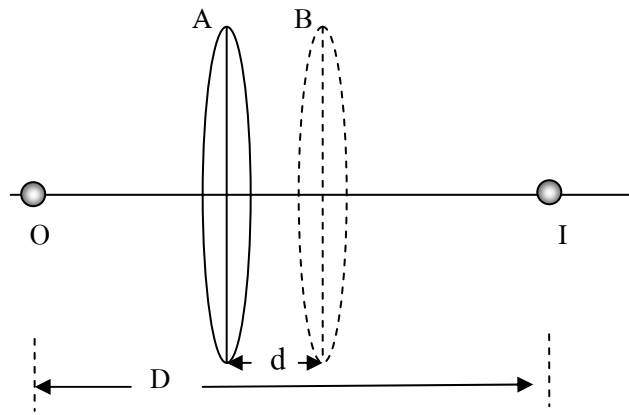
$$f = \frac{1}{OB}$$

(6.31)

ข. การเลื่อนเลนส์

ให้วัตถุกับฉากอยู่กับที่ห่างกัน (D) อย่างน้อย 4 เท่าของความยาวโฟกัส ของเลนส์ แล้วเลื่อนเลนส์หาตำแหน่งของเลนส์ ที่ให้ภาพคมชัดบนฉาก สมมติเลื่อนเลนส์จากตำแหน่ง ที่ให้ภาพคมชัดเป็นระยะ d แล้วให้ภาพคมชัดบนฉาก เป็นครั้งที่สอง

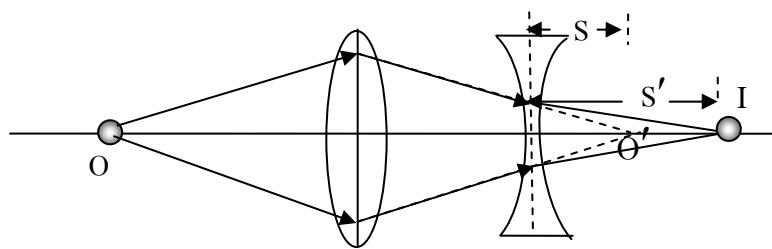
$$\text{ความยาวโฟกัสของเลนส์ } (f) = \frac{D^2 - d^2}{4D} \quad (6.32)$$



รูปที่ 6.28 แสดงการหาความยาวโฟกัสของเลนส์ โดยการเลื่อนเลนส์

เลนส์เว้า อาจหาค่าความยาวโฟกัส โดยวิธี

ก. ใช้เลนส์นูนเข้าช่วย



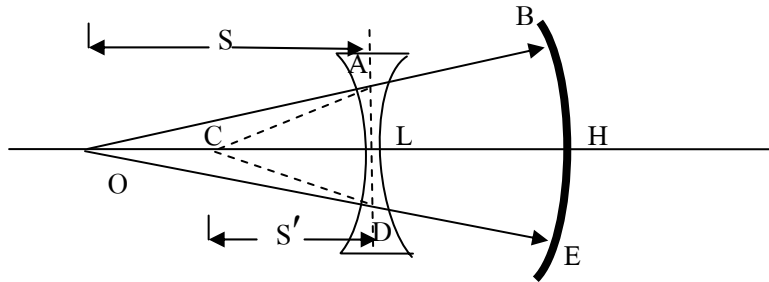
รูปที่ 6.29 แสดงการหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า

ปกติเลนส์เว้าให้ภาพเสมือนของวัตถุจริง แต่จะให้ภาพจริงของวัตถุเสมือน เราจึงนำเลนส์ นูนมาวางหน้าเลนส์เว้า ระยะวัตถุจริง O มากกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์นูน ดังรูปที่ 6.29 ทำให้ รังสีของแสงที่ผ่านเลนส์นูนถูกบีบให้รวมกันที่จุด O' ซึ่ง O' เป็นวัตถุเสมือนของเลนส์เว้า เกิด ภาพจริง I ถัดออกไปจากจุด O'

ความยาวโฟกัสของเลนส์ (f) คือ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \quad (6.33)$$

ข. ใช้กระจกเว้าเข้าช่วย



รูปที่ 6.30 แสดงการหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้า

วางวัตถุ (O) หน้าเลนส์เว้า แสงจากวัตถุ O ตกกระทบเลนส์ ผ่านเลนส์ไปตกกระทบกระจกเว้า เลื่อนวัตถุ O จนกระทั่งแสงสะท้อนจากกระจก เดินกลับในแนวเดิม ดังรูปที่ 6.30

กรณีนี้ จะเกิดภาพที่ตำแหน่งเดียวกับวัตถุ LO เป็นระยะวัตถุ (S) รังสี AB, DE ตั้งฉากกับกระจกเงา รัศมี R เสมือนมาจากจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจก (C) LC เป็นระยะภาพ (S')

$$\text{จากรูป } S' = CM - LM = R - LM$$

ความยาวโฟกัสของเลนส์ (f) คือ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} \quad (6.34)$$

เลนส์บางวางประกบกัน

เมื่อนำเลนส์บางหลายอันมาประกบกับ เลนส์ทั้งคู่จะทำหน้าที่ เสมือนเป็นเลนส์ใหม่
อันหนึ่ง

สมมติ $f =$ ความยาวโฟกัสของเลนส์อันใหม่หรือเลนส์รวม

$f_1, f_2, f_3, \dots, f_n =$ ความยาวโฟกัสของเลนส์แต่ละอัน

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots + \frac{1}{f_n} \quad (6.35)$$

ต้องใส่เครื่องหมาย +,- แสดงชนิดของเลนส์เสมอ

ตัวอย่างที่ 6.10 เลนส์อันหนึ่งมีความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุไว้หน้าเลนส์จะเกิดภาพหัวตั้งหน้าเลนส์โดยมีขนาดภาพเป็นครึ่งหนึ่งของวัตถุ จงหาระยะวัตถุ

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้เนื่องจากภาพที่ได้เป็นภาพหัวตั้งหน้าเลนส์โดยมีขนาดเล็กกว่าวัตถุแสดงว่า

เป็นเลนส์เว้า นั่นคือ $f = -10 \text{ cm}$, $S' = \frac{S}{2}$, $S = ?$

จาก $\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'}$

แทนค่า $\frac{1}{-10} = \frac{1}{S} + \frac{1}{-\frac{S}{2}}$

$$\frac{1}{-10} = \frac{1}{S} - \frac{2}{S} = -\frac{1}{S}$$

$$S = 10 \text{ cm}$$

ระยะวัตถุเท่ากับ 10 เซนติเมตร

ตัวอย่างที่ 6.11 เลนส์นูนอันหนึ่งมีดัชนีหักเหแสงในอากาศเท่ากับ $\frac{3}{2}$ และมีความยาวโฟกัส 20

เซนติเมตร ถ้านำเลนส์ชนิดนี้ไปวางในน้ำที่มีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ $\frac{4}{3}$ เลนส์จะมี

ความยาวโฟกัสเท่าใด

วิธีทำ ให้ f_a และ f_w เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูนในอากาศและในน้ำ ตามลำดับ

และ n_L และ n_w เป็นดัชนีหักเหแสงของเลนส์นูนในอากาศและในน้ำ ตามลำดับ

โจทย์กำหนดให้ $n_L = \frac{3}{2}$, $n_w = \frac{4}{3}$ และ $f_a = 20 \text{ cm}$

ดัชนีหักเหแสงของเลนส์นูนอันนี้เทียบกับน้ำ เท่ากับ $\frac{n_L}{n_w} = \frac{3/2}{4/3} = \frac{9}{8}$

จาก $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

จะได้ $\frac{1}{f_a} = (n_L - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

และ $\frac{1}{f_w} = (n_{LW} - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

$$\text{แสดงว่า } \frac{f_w}{f_a} = \frac{(n_L - 1) \frac{3}{8} - 1}{(n_{Lw} - 1) \frac{9}{8}} = 4$$

$$\text{จะได้ว่า } f_w = 4f_a = 4(20) = 80 \text{ cm}$$

นั่นคือ เลนส์ชนิดนี้มีความยาวโฟกัสในน้ำเท่ากับ 80 เซนติเมตร

ตัวอย่างที่ 6.12 เลนส์บาง 3 อัน เป็นเลนส์นูน 1 อัน ความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร และเลนส์เว้า 2 อัน ความยาวโฟกัส 5 เซนติเมตร, 15 เซนติเมตร ตามลำดับ เมื่อนำเลนส์ทั้งสามมาประกบกันในอากาศ จะมีความยาวโฟกัสของเลนส์ชุดนี้เท่าใด

วิธีทำ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{10 \text{ cm}} + \frac{1}{5 \text{ cm}} + \frac{1}{15 \text{ cm}} = -\frac{5}{30} \text{ cm}$$

$$f = -6 \text{ cm}$$

เมื่อนำเลนส์ทั้งสามมาประกบกันในอากาศ จะมีความยาวโฟกัสของเลนส์ชุดนี้เท่ากับ 16 เซนติเมตร

กำลังของเลนส์

กำลังของเลนส์ หมายถึงความสามารถของเลนส์ที่จะทำให้แสงหักเหออกจากเลนส์เบี่ยงเบนไปจากแนวรังสีตกกระทบเลนส์ ได้มากหรือน้อย ถ้าเบนไปได้มาก กำลังของเลนส์มาก แต่ถ้าเบนไปได้น้อย กำลังของเลนส์น้อย

ให้ P แทน กำลังของเลนส์ในหน่วยไดออปเตอร์ (Diopter)

f แทนความยาวของเลนส์ในหน่วยเมตร

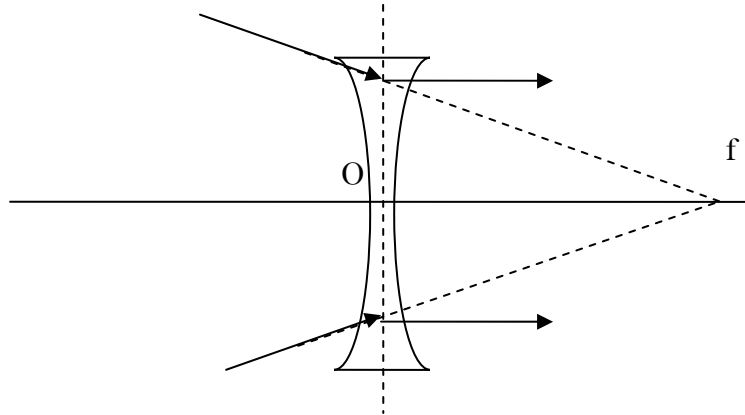
$$P = \frac{1}{f \text{ (m)}} \quad (6.36)$$

กำลังของเลนส์บางหลายอันประกบกัน (P) หาได้จากสมการ

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n \quad (6.37)$$

เมื่อ P_1, P_2, \dots, P_n เป็นกำลังของเลนส์แต่ละอันประกบกัน

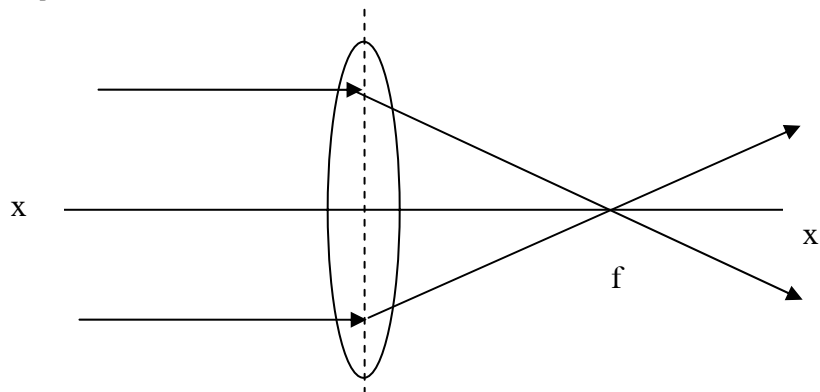
ภาพจริงหรือภาพเสมือนจากเลนส์เว้า



รูปที่ 6.31 แสดงทิศทางการหักเหของแสงผ่านเลนส์เว้าเมื่อแสงตกกระทบบนจุดโฟกัส

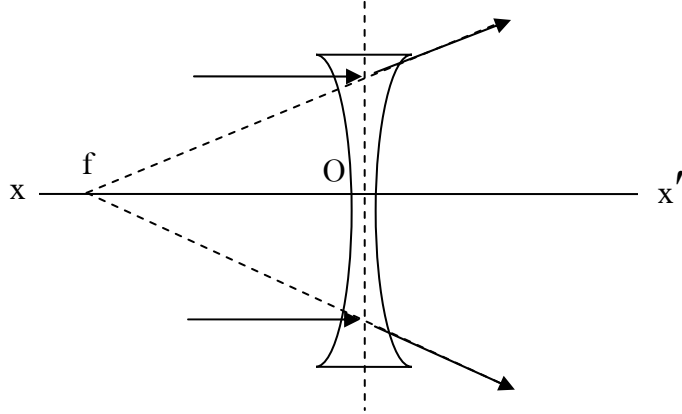
1. ถ้ารังสีตกกระทบบนพุ่งเข้าหาจุด f รังสีหักเหจะออกเป็นแสงขนาน
2. ถ้ารังสีตกกระทบบนพุ่งเข้าระหว่าง O กับ f ย่อมได้รังสีหักเหตัดแกนเลยออกไปนอกจุด f เป็นภาพจริง
3. ถ้ารังสีตกกระทบบนพุ่งเข้าเลยจุด f ออกไป รังสีหักเหย่อมหักเหออกจากเส้นแกนขนานแกน จึงเกิดภาพเสมือน

เลนส์นูน ถ้าให้รังสีขนานแกนหลัก (xx') รังสีหักเหจะผ่านจุดโฟกัสจะเกิดภาพจริง



รูปที่ 6.32 แสดงทิศทางการหักเหของแสงผ่านเลนส์นูนเมื่อแสงตกกระทบบนจุดโฟกัส

เลนส์เว้า ถ้าให้รังสีขนานแกนหลัก (xx') รังสีหักเหจะคล้ายผ่านจุด ๆ หนึ่ง เรียกว่า จุดโฟกัส จะเกิดภาพเสมือน



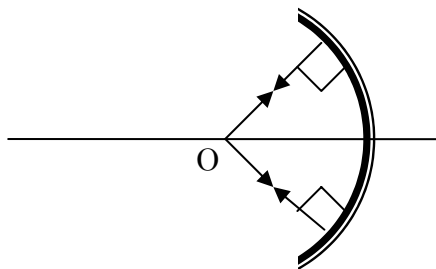
รูปที่ 6.33 แสดงทิศทางการหักเหของแสงขนานผ่านเลนส์เว้า

การคำนวณภาพที่เกิดขึ้นจากกระจกและเลนส์โดยภาพที่เกิดขึ้นอยู่ที่เดียวกับวัตถุ

ภาพที่เกิดขึ้นอยู่ที่เดียวกับวัตถุ แสดงว่า รังสีตกกระทบที่กระจกจะต้องสะท้อนกลับทางเดิม จึงจะทำให้เกิดภาพที่เดียวกับวัตถุ ดังนั้น รังสีที่ตกกระทบที่กระจกจึงเป็นรังสีตกตั้งฉากกับผิวสะท้อน

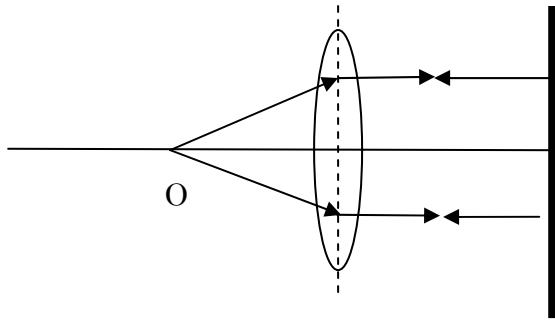
การคำนวณให้หาตำแหน่งภาพครั้งแรกเสียก่อนแล้วจัดตำแหน่งกระจกให้รังสีจากภาพมาตกกระทบตั้งฉากกับกระจก ดังกรณีต่อไปนี้

เมื่อวางวัตถุไว้หน้ากระจกเว้า ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางความโค้งจะได้แสงสะท้อนมาตามแนวเดิม



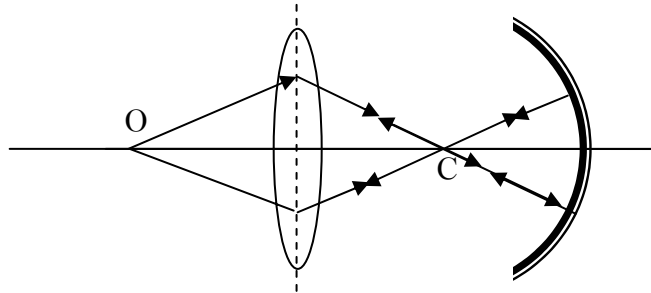
รูปที่ 6.34 แสดงภาพเมื่อวางวัตถุไว้หน้ากระจกเว้า ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางความโค้ง

วางวัตถุอยู่หน้าเลนส์นูนและให้ไปสะท้อนกับกระจกเงาระนาบ ซึ่งวางไว้อีกด้านหนึ่งของเลนส์



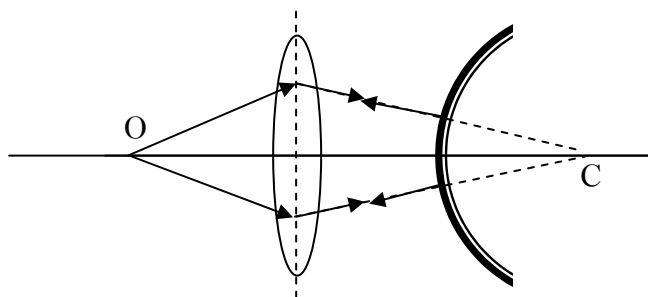
รูปที่ 6.35 แสดงภาพเมื่อวางวัตถุอยู่หน้าเลนส์นูนและให้ไปสะท้อนกับกระจกเงาระนาบ
 ในกรณีนี้ต้องวางวัตถุไว้ที่จุดโฟกัสของเลนส์นูน โดยไม่ขึ้นกับระยะระหว่าง
 เลนส์กับกระจก

วางวัตถุหน้าเลนส์นูนให้สะท้อนกับกระจกเว้า ซึ่งวางอีกข้างหนึ่งของเลนส์



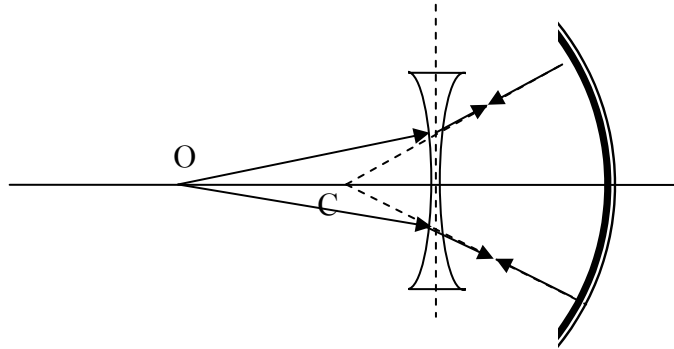
รูปที่ 6.36 แสดงภาพเมื่อวางวัตถุหน้าเลนส์นูนให้สะท้อนกับกระจกเว้า
 กรณีนี้ต้องวางวัตถุไว้หน้าเลนส์ ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดภาพที่เกิดจากเลนส์นูนอยู่ที่จุด
 ศูนย์กลางความโค้งของกระจกเว้า

วางวัตถุหน้าเลนส์ ให้สะท้อนกับกระจกเงานูน ซึ่งวางอีกด้านหนึ่งของเลนส์



รูปที่ 6.37 แสดงภาพเมื่อวางวัตถุหน้าเลนส์ ให้สะท้อนกับกระจกเงานูน
 กรณีนี้ต้องวางวัตถุไว้หน้าเลนส์ ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดภาพที่เกิดจากเลนส์นูนอยู่
 ที่จุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกเงานูน

วางวัตถุไว้หน้าเลนส์เว้าให้ไปสะท้อน



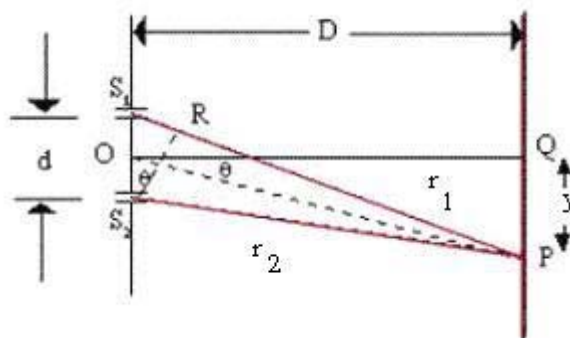
รูปที่ 6.38 แสดงภาพเมื่อวางวัตถุไว้หน้าเลนส์เว้าให้ไปสะท้อน

กรณีนี้ต้องวางวัตถุไว้หน้าเลนส์เว้า ในตำแหน่งที่ทำให้เกิดภาพจากเลนส์เว้าเกิดที่ จุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกเว้า

การแทรกสอดของแสง

การแทรกสอดของแสงเกิดขึ้นเนื่องจากมีคลื่นแสงอาพันธ์ (ความถี่เดียวกัน มุมต่างเฟสคงที่) ตั้งแต่ 2 ขบวนคลื่นที่เข้ามาซ้อนทับกัน ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริม (แถบสว่าง) และหักล้าง (แถบมืด) บนฉากรับแสง โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์

การแทรกสอดของแสงจากช่องแคบคู่



รูปที่ 6.39 แสดงการแทรกสอดของแสงจากช่องแคบคู่

จากการทดลองของโทมัส ยัง โดยให้แสงผ่านช่องแคบสองช่อง S_1 และ S_2 แล้วนำฉากด้านหลังมารับช่องแคบ

เนื่องจาก S_1 และ S_2 ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่มีความถี่ และเฟสตรงกันเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกัน แทรกสอดกันที่จุด P ซึ่งห่างจากฉากเป็นระยะทาง r_1 และ r_2 เมื่อแสงเดินทางมาถึงจุด P จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริมสร้าง (เฟสตรงกัน) จะเป็นแถบสว่าง แต่เป็นการแทรกสอดแบบหักล้าง (เฟสตรงกันข้าม) จะเป็นแถบมืด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับผลต่างทางเดินแสงจาก S_1 และ S_2 ไปยังฉาก คือ $|r_1 - r_2|$ ดังรูป

จากหลักการรวมกันของคลื่นเคลื่อนที่ทางขวา กำหนดให้

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

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

$$y = y_1 + y_2$$

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

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

แต่

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

$$y = A \left[2 \sin\left(\frac{\omega t - kr_1 + \omega t - kr_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega t - kr_1 - \omega t + kr_2}{2}\right) \right]$$

$$= A \left[2 \sin\left(\frac{2\omega t - kr_1 - kr_2}{2}\right) \cos\left(\frac{-kr_1 + kr_2}{2}\right) \right]$$

$$= A \left[2 \cos k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{k(r_1 + r_2)}{2}\right) \right]$$

$$= 2A \cos k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) \sin\left(\omega t - \frac{k(r_1 + r_2)}{2}\right)$$

เมื่อเทียบกับสมการคลื่นจะได้แอมพลิจูด (Amplitude) คือ $2A \cos\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right)$ แอมพลิจูด

จะมีค่าสูงสุด (A_m) เมื่อ $\cos k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = 1$ จะได้ $A_m = 2A$ ค่า $\cos k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = -1$ จะ

เกิดขึ้นได้ในกรณีต่อไปนี้

$$k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = 0, \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$$

หรือ

$$k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = m\pi$$

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

แต่ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้

$$\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = m\pi$$

$$\frac{\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) = m\pi$$

$$r_2 - r_1 = m\pi\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)$$

$$= m\lambda$$

พิจารณาจากรูป

$$r_2 - r_1 = a \sin \theta$$

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

(6.38)

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

ในทำนองเดียวกันแอมพลิจูดจะมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 0 เมื่อ $\cos k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = 0$ ค่า

$\cos k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = 1$ จะเกิดขึ้นได้ในกรณีดังต่อไปนี้

$$k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

หรือ $k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = m\pi - \frac{\pi}{2}$

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

แต่ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้

$$\begin{aligned}\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) &= m\pi - \frac{\pi}{2} \\ (r_2 - r_1) &= \left(m\pi - \frac{\pi}{2}\right)\left(\frac{\lambda}{\pi}\right) \\ &= \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda\end{aligned}$$

พิจารณาจากรูป

$$\begin{aligned}|r_2 - r_1| &= d \sin \theta \\ d \sin \theta &= \left(m - \frac{1}{2}\right)\lambda\end{aligned}\tag{6.39}$$

เมื่อ $m = 1, 2, 3, \dots$

นอกจากนี้ $k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right)$ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$k\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) = m\pi + \frac{\pi}{2}$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$ ก็ได้

แต่ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ จะได้

$$\begin{aligned}\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{r_2 - r_1}{2}\right) &= m\pi + \frac{\pi}{2} \\ r_2 - r_1 &= \left(m\lambda + \frac{\lambda}{2}\right)\left(\frac{\lambda}{\pi}\right) \\ &= \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda\end{aligned}$$

พิจารณาจากรูป

$$\begin{aligned}|r_2 - r_1| &= d \sin \theta \\ d \sin \theta &= \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda\end{aligned}\tag{6.40}$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$ ก็ได้

จากรูปเมื่อลากเส้นตรง S_2 มาพบกับเส้น r_1 ที่จุด R จะทำให้ $S_2P = PR$ เนื่องจาก D มากกว่า d มาก ๆ ดังนั้น S_2R จึงถือว่าตั้งฉากกับเส้น r_1 และ r_2 จะได้ว่า

$$S_1R = |r_2 - r_1| = d \sin \theta \quad (6.41)$$

โดยปกติแล้ว $\lambda \ll D$ มุม θ จึงมีค่าน้อย ๆ ดังนั้น

$$\sin \theta = \tan \theta \approx \frac{y}{D} \quad (6.42)$$

เมื่อ y คือ ระยะห่างจากแถบสว่างกลาง (Q) ถึงจุด P
 D คือ ระยะห่างระหว่างช่องแคบกับฉาก

จากสมการ (6.38), (6.39), (6.40), (6.41) และ (6.42) สามารถนำมาเขียนใหม่ได้เป็น
 สมการแถบสว่าง (ตรงกลางเป็นแถบสว่าง)

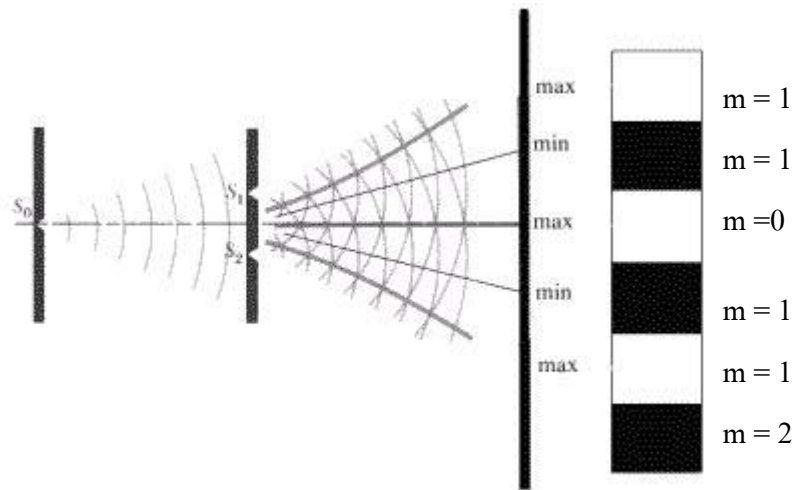
$$d \sin \theta = m\lambda \quad (6.43)$$

$$d \left(\frac{y}{D} \right) = m\lambda \quad (6.44)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$

สมการแถบมืด สามารถคำนวณได้จากสมการพิจารณาจากเงื่อนไขข้างต้น โดยพิจารณา
 เงื่อนไขดังนี้

สมการแถบมืด (ตรงกลางเป็นแถบสว่าง)



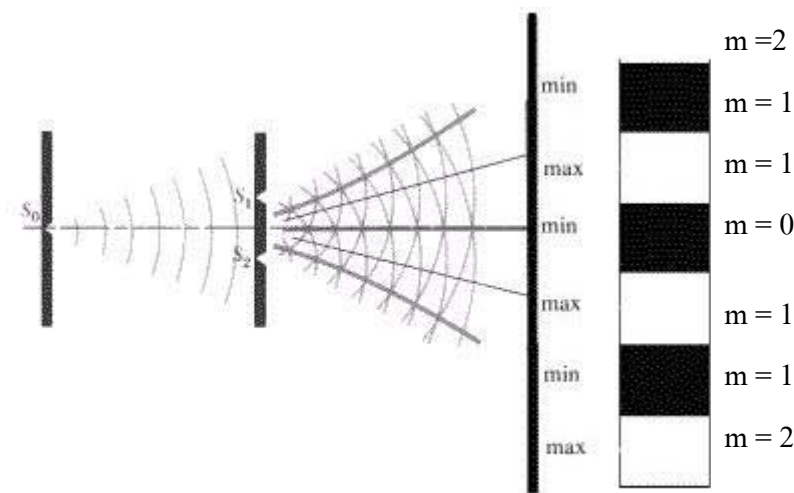
รูปที่ 6.40 แสดงภาพที่เกิดสมการแถบมืด (ตรงกลางเป็นแถบสว่าง)

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (6.45)$$

$$d \left(\frac{y}{D} \right) = \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda \quad (6.46)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$

หรือสามารถคำนวณได้จากสมการแถบมืด (ตรงกลางเป็นแถบมืด)



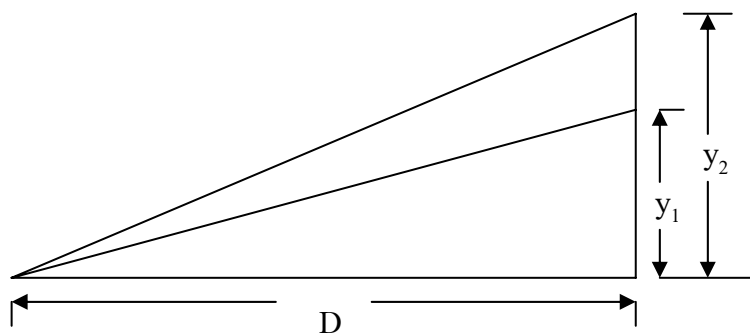
รูปที่ 6.41 แสดงภาพที่เกิดสมการแถบมืด (ตรงกลางเป็นแถบมืด)

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (6.47)$$

$$d \left(\frac{y}{D}\right) = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (6.48)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, \dots$

การคำนวณหาระยะห่างแถบสว่างกลาง ($m = 0$) ถึงแถบสว่างใด ๆ ที่อยู่ใกล้กัน



รูปที่ 6.42 ภาพแสดงระยะห่างแถบสว่างกลาง ($m = 0$) ถึงแถบสว่างใด ๆ ที่อยู่ใกล้กัน

- ถ้า y_1 เป็นระยะห่างของแถบสว่างที่ m จากแถบสว่างกลาง
- y_2 เป็นระยะห่างจากแถบสว่างที่ $m + 1$ (แถบสว่างกลางถัดไป) จากแถบสว่างกลางจะได้

จากสมการแถบสว่าง

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

$$\frac{dy_1}{D} = m\lambda$$

$$y_1 = \frac{m\lambda D}{d}$$

$$\frac{dy_1}{D} = (m+1)\lambda$$

$$y_2 = \frac{(m+1)\lambda D}{d}$$

$$y_2 - y_1 = \Delta y = \frac{\lambda D}{d} \quad (6.49)$$

ในทำนองเดียวกันแถบมืดที่อยู่ถัดกันจากแนวสว่างตรงกลาง คือ

$$y_2 - y_1 = \Delta y = \frac{\lambda D}{2d} \quad (6.50)$$

ตัวอย่างที่ 6.13 แสงมีความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ผ่านช่องแคบคู่ขนานอยู่ห่างจากฉากเท่ากับ 1 เมตร ปรากฏว่า ระยะระหว่างแถบสว่างกับแถบสว่างที่อยู่ติดกัน เท่ากับ 6 มิลลิเมตร ขณะนั้นช่องแคบอยู่ห่างกันเท่าไร และถ้าเลื่อนฉากออกไปอีก 1 เมตร ระยะระหว่างแถบสว่างกับแถบสว่างที่อยู่ติดกัน จะเท่ากับเท่าใด

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $\lambda = 600 \times 10^{-9} \text{ m}$, $y_2 - y_1 = 6 \times 10^{-3} \text{ m}$, $D = 1 \text{ m}$, $d = ?$

$$\text{จากสูตร } y_2 - y_1 = \frac{\lambda D}{d}$$

$$\text{จะได้ว่า } 6 \times 10^{-3} = \frac{(600 \times 10^{-9})(1)}{d}$$

$$d = 100 \times 10^{-6} \text{ m หรือ } 100 \text{ ไมโครเมตร}$$

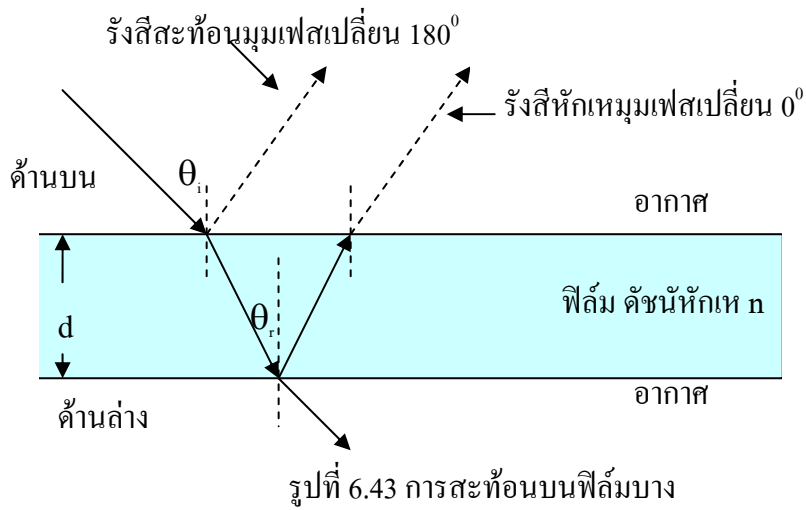
ถ้า $D = 2 \text{ m}$, $y_2 - y_1 = ?$

$$\text{จากสูตร } y_2 - y_1 = \frac{\lambda D}{d}$$

$$\text{จะได้ว่า } y_2 - y_1 = \frac{(600 \times 10^{-9})(2)}{100 \times 10^{-6}}$$

$$y_2 - y_1 = 12 \times 10^{-3} \text{ m หรือ } 12 \text{ มิลลิเมตร}$$

การแทรกสอดโดยการสะท้อนหรือการส่งผ่านบนฟิล์มบาง



รูปที่ 6.43 การสะท้อนบนฟิล์มบาง

การแทรกสอดของคลื่นแสงที่ผิวฟองสบู่หรือผิวน้ำที่มีคราบน้ำมัน จะเกิดการแทรกสอดระหว่างรังสีสะท้อนที่ผิว (มุมเฟสเปลี่ยนไป 180°) กับรังสีหักเหที่เข้าไปในแผ่นฟิล์มแล้วไปสะท้อนที่ผิวด้านล่าง และเกิดการหักเหออกจากผิวด้านบน (มุมเฟสคงที่) แสดงว่าการแทรกสอดของคลื่นสองขบวนมีเฟสต่างกัน 180° ดังนั้นสูตรในการคำนวณการแทรกสอดที่ให้ความเข้มสูงสุดโดยการสะท้อนและการหักเหพิจารณาได้ดังนี้

เมื่อมุมตกกระทบ θ_i จะได้

$$2dn \cos \theta_r = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (6.51)$$

เป็นสมการแทรกที่ให้ค่าความเข้มมากที่สุดของการสะท้อน และน้อยที่สุดสำหรับการส่งผ่าน

$$2dn \cos \theta_r = m\lambda \quad (6.52)$$

เป็นสมการการแทรกสอดที่ให้ความเข้มมากที่สุดของการส่งผ่าน และน้อยที่สุดสำหรับการสะท้อน

เมื่อ d คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม

n คือ ดัชนีหักเหของแผ่นฟิล์ม

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

เมื่อมุมตกกระทบ $\theta_i = 0^\circ$ จะได้

สมการแถบสว่าง คือ
$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda \quad (6.53)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

สมการแถบมืด คือ $2dn = m\lambda$ (6.54)

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

การสะท้อนของคลื่นแสงจะไม่เปลี่ยนเฟส เมื่อแสงเดินทางในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห มากกว่า(ความหนาแน่นมาก)ไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเห น้อย(ความหนาแน่นน้อย) แต่ถ้าแสง เดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห น้อยกว่า(ความหนาแน่นน้อย)ไปสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่น มากกว่า(ความหนาแน่นมาก)คลื่นที่สะท้อนจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา

จาก $n = \frac{c}{v} = \frac{f\lambda_c}{f\lambda_v}$ เมื่อ f คงที่

$$n = \frac{\lambda_c}{\lambda_v} \quad (6.55)$$

เมื่อ n คือดัชนีหักเหของฟิล์ม

λ_c คือความยาวคลื่นแสงในอากาศ

λ_v คือความยาวคลื่นแสงในแผ่นฟิล์ม

เนื่องจากผิวทั้งสองต่างกัน คลื่นสะท้อนที่ผิวด้านบนและด้านล่างจะมีเฟสต่างกัน(หักล้าง กัน) สูตรที่ใช้ในการคำนวณเมื่อ $\theta_i = 0$ จะได้สมการแถบสว่าง

$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (6.56)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

สมการแถบมืด คือ $2dn = m\lambda$ (6.57)

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

กรณีมีเฟสเดียวกัน (เสริมกัน) สูตรที่ใช้ในการคำนวณเมื่อ $\theta_i = 0$ จะได้สมการแถบมืด

$$2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (6.58)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

สมการแถบสว่าง

$$2dn = m\lambda \quad (6.59)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

ตัวอย่างที่ 6.14 แสงสีขาวเมื่อส่องไปกระทบฟิล์มน้ำในอากาศ ซึ่งมีความหนา 320 นาโนเมตร และดัชนีหักเห 1.33 จะมองเห็นแสงสะท้อนเป็นสีอะไร

วิธีทำ ถ้ามองเห็นแสงแสดงว่าตำแหน่งนั้นเป็นแถบสว่าง

โจทย์กำหนดให้ $d = 320 \times 10^{-9} \text{ m}$, $n = 1.33$, $\lambda = ?$

$$\text{จากสูตร } 2dn = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad \text{หรือ} \quad \lambda = \frac{2dn}{m + \frac{1}{2}}$$

$$\text{จะได้ว่า} \quad \lambda = \frac{2(320 \times 10^{-9})(1.33)}{m + \frac{1}{2}}$$

ถ้า $m = 0$ $\lambda = 1,702$ นาโนเมตร

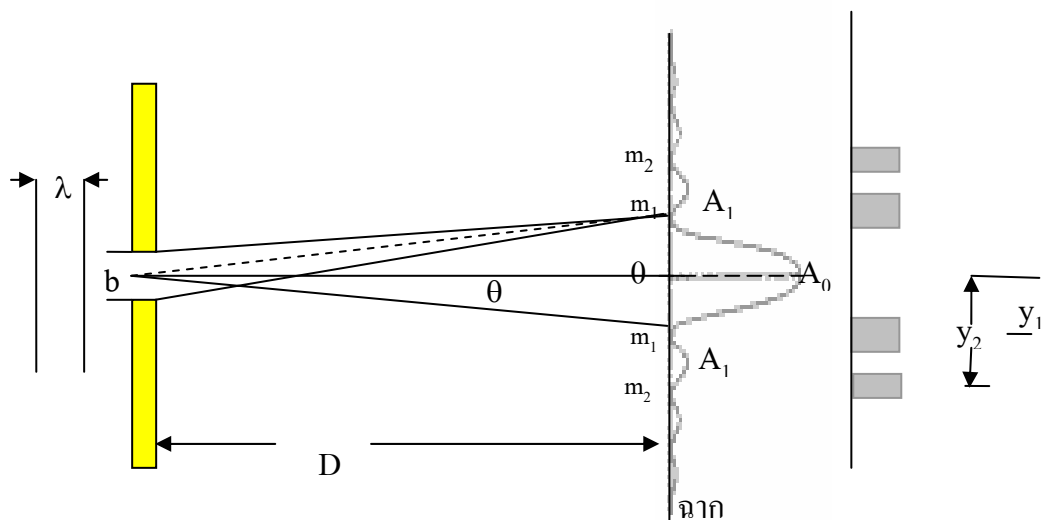
$m = 1$ $\lambda = 567.5$ นาโนเมตร

$m = 2$ $\lambda = 340$ นาโนเมตร

ดังนั้นความยาวคลื่นที่สามารถมองเห็นได้ เป็นความยาวคลื่นเมื่อ $m = 2$ มีค่าเท่ากับ 567.5 นาโนเมตร เป็นสีเขียวอมเหลือง

การเลี้ยวเบนของแสง

การเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตเดี่ยวของฟรอนโฮเฟอร์



รูปที่ 6.44 การเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตเดี่ยวของฟรอนโฮเฟอร์

สมการแถบมืด

$$b \sin \theta = m\lambda \quad (6.60)$$

เมื่อ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

ถ้ามุม θ น้อยมาก ๆ $\theta \approx \sin \theta \approx \tan \theta$

$$b \tan \theta = m\lambda \quad (6.61)$$

$$b \left(\frac{y}{D} \right) = m\lambda \quad (6.62)$$

ระยะห่างระหว่างแถบมืดที่ m ใด ๆ กับแถบสว่างแนวกลางที่อยู่ถัดกัน จากสมการที่ 6.60

$$\begin{aligned} b \sin \theta &= m\lambda \\ b \left(\frac{y_1}{D} \right) &= 1\lambda \quad \text{เมื่อ } (m = 1) \\ y_1 &= \frac{D\lambda}{b} \end{aligned} \quad (6.63)$$

$$\begin{aligned} b \left(\frac{y_2}{D} \right) &= 2\lambda \quad \text{เมื่อ } (m = 2) \\ y_2 &= \frac{2D\lambda}{b} \end{aligned} \quad (6.64)$$

(6.64) - (6.63) จะได้

$$\begin{aligned} y_2 - y_1 &= \frac{2D\lambda}{b} - \frac{D\lambda}{b} \\ &= \frac{D\lambda}{b} \end{aligned}$$

ดังนั้นระยะห่างระหว่างแถบมืดที่ m ใด ๆ กับแถบสว่างแนวกลาง คือ

$$Y_m = \frac{mD\lambda}{b} \quad (6.65)$$

ตัวอย่างที่ 6.15 แสงสีแดงมีความยาวคลื่น 5.9×10^{-7} เมตร เคลื่อนที่ผ่านช่องแคบที่มีความกว้าง 0.5 มิลลิเมตร แล้วเกิดแถบการซ้อนทับกันบนฉาก ซึ่งห่างจากช่องแคบ 1 เมตร ขอบแถบมืดมีดทั้งสองข้างของแถบสว่างตรงกลาง จะอยู่ห่างกันเท่าใด

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $\lambda = 5.9 \times 10^{-7}$ m, $b = 5 \times 10^{-4}$ m, $D = 1$ m, $m = 1$, $y_1 = ?$
ระยะห่างระหว่างแถบมืดที่ m ใด ๆ กับแถบสว่างแนวกลางที่อยู่ติดกัน ใช้สูตร

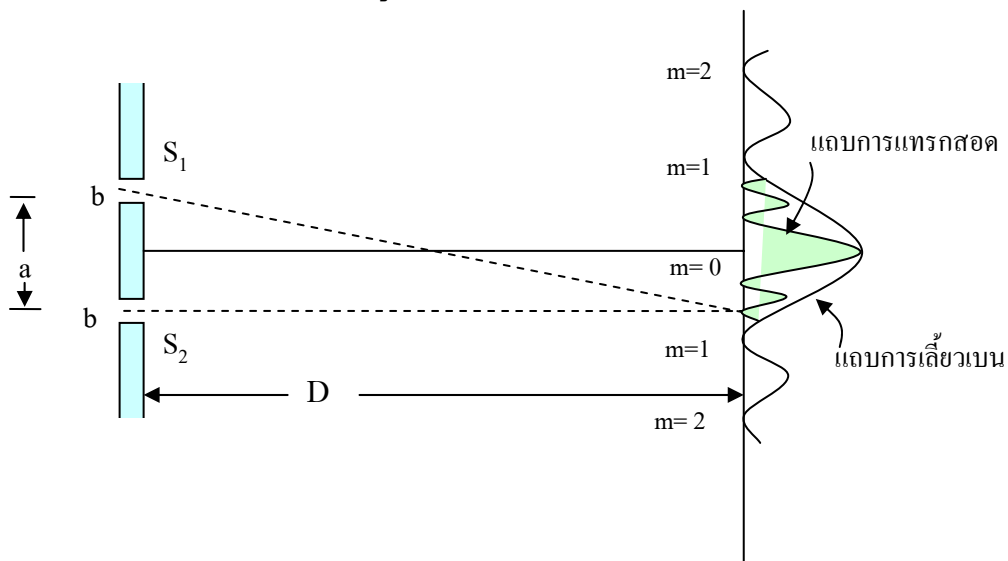
$$b \left(\frac{y_m}{D} \right) = m\lambda$$

$$\text{จะได้ } (5 \times 10^{-4}) \left(\frac{y_1}{1} \right) = (1)(5.9 \times 10^{-7})$$

$$y_1 = 11.8 \times 10^{-4} \text{ m}$$

เพราะฉะนั้นขอบแถบมืดทั้งสองข้างของแถบสว่างตรงกลาง จะอยู่ห่างกันเท่ากับ 2.36 มิลลิเมตร

การเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตคู่ของฟรอนโฮเฟอร์



รูปที่ 6.45 การเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตคู่ของฟรอนโฮเฟอร์

สมการแถบการแทรกสอด(แถบสว่าง)

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (6.66)$$

เมื่อ a คือระยะห่างระหว่างช่องสลิต

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

สมการแถบการเลี้ยวเบน(แถบมืด)

$$b \sin \theta = m\lambda \quad (6.67)$$

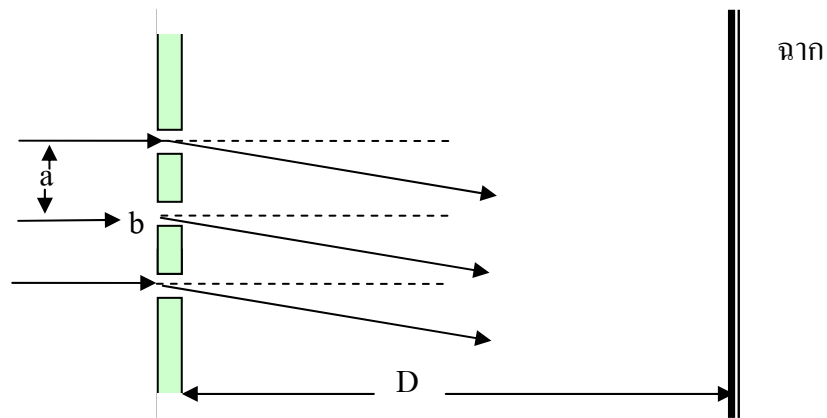
เมื่อ b คือความกว้างของช่องสลิต

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

จำนวนแถบการเลี้ยวเบนทั้งหมด (N) ซึ่งอยู่ในแถบเลี้ยวเบน คือ

$$N = \frac{2a}{b} - 1 \quad (6.68)$$

การเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง



รูปที่ 6.46 แสดงการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

พิจารณาแผ่นเกรตติงที่มีความกว้างของช่อง b และห่างกันเป็นระยะ a เป็นจำนวนมาก และเนื่องจากความกว้างของแต่ละช่องเล็กมาก ดังนั้นความกว้างของริ้วสว่างกลางของการเลี้ยวเบน จะใหญ่มากจึงไม่ปรากฏบนฉากแต่จะเห็นริ้วการแทรกสอดอย่างเดียวก็ได้

สมการแถบสว่าง

$$a \sin \theta = m\lambda \quad (6.69)$$

เมื่อ a คือระยะห่างระหว่างช่อง

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

สมการแถบมืด

$$b \sin \theta = m\lambda \quad (6.70)$$

เมื่อ b คือความกว้างของ 1 ช่องเกรตติง(1 เส้นเกรตติง)

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

เนื่องจากช่องสลิตมีขนาดเล็กมากๆ $a = b$ คือความกว้างของ 1 ช่องเกรตติง (1 เส้นเกรตติง)

กำลังแยกของเกรตติง (R)

ถ้าจำนวนเส้น (จำนวนช่อง) ของเกรตติงยิ่งมาก มุมรองรับแถบสว่างจะมีค่าน้อยลงทำให้เกรตติงสามารถแยกแถบสว่างได้อย่างชัดเจนจะได้

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (6.71)$$

เมื่อ N คือจำนวนช่องของเกรตติง

m คือลำดับของแถบสว่าง

λ คือความยาวคลื่นเฉลี่ย

$\Delta\lambda$ คือความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่นทั้งสอง

ตัวอย่างที่ 6.16 แสงสีขาวผ่านเกรตติงที่มีจำนวนช่องเท่ากับ 200 ช่อง ต่อความยาว 1 เซนติเมตร ถ้าต้องการให้แสงสีเขียว (ความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร) เลี้ยวเบนห่างจากแถบสีขาว 0.6 เซนติเมตร จะต้องวางฉากรับให้ห่างจากเกรตติงอย่างน้อยเป็นระยะเท่าใด

วิธีทำ โจทย์กำหนดให้ $\lambda = 500 \times 10^{-9} \text{ m}$, $a = \frac{10^{-2}}{200} \text{ m}$, $m = 1$, $y_1 = 0.6 \times 10^{-2} \text{ m}$,

D = ?

จากสูตร $a \sin \theta = m\lambda$ หรือ $a \frac{y_m}{D} = m\lambda$

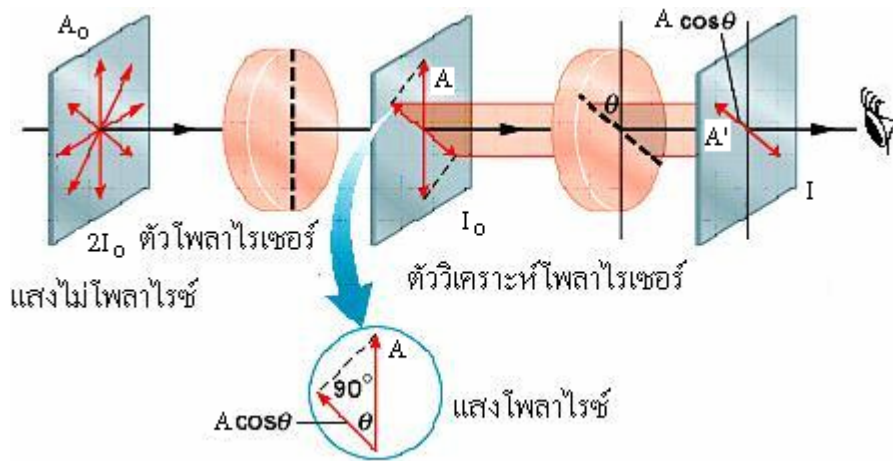
จะได้ว่า $\left(\frac{10^{-2}}{200}\right) \left(\frac{0.6 \times 10^{-2}}{D}\right) = (1)(500 \times 10^{-9})$

$$D = 60 \times 10^{-2} \text{ m}$$

นั่นคือ จะต้องวางฉากรับให้ห่างจากเกรตติงอย่างน้อยเป็นระยะเท่ากับ 60 เซนติเมตร

โพลาไรเซชัน (Polarization)

ปรากฏการณ์โพลาไรเซชันของคลื่นจะเกิดเฉพาะคลื่นตามขวางเท่านั้น การทำให้แสงโพลาไรเซชันโดยใช้แผ่นโพลาไรซ์



รูปที่ 6.47 แสดงการเกิดปรากฏการณ์โพลาไรเซชัน

ถ้าให้แสงโพลาไรซ์หลังผ่านแผ่นทำแสงโพลาไรซ์มีแอมพลิจูด A หมุนแผ่นวิเคราะห์แสงโพลาไรซ์ทำมุม θ กับแกนแผ่นทำแสงโพลาไรซ์แสงที่ออกมาจะมีแอมพลิจูด A'

$$A' = A \cos \theta \quad (6.72)$$

ความเข้มแสง $I_0 \propto A^2$ ดังนั้นความเข้มแสงหลังผ่านแผ่นวิเคราะห์

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (6.73)$$

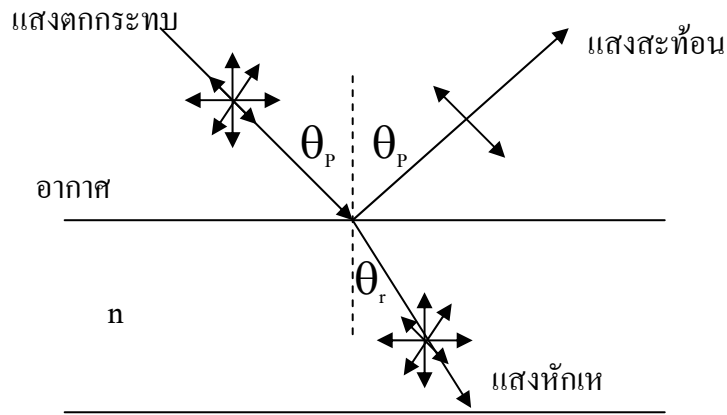
สมการนี้เรียกว่า กฎของมาลุส เมื่อ

I_0 คือความเข้มแสงก่อนผ่านแผ่นวิเคราะห์แสงโพลาไรซ์

I คือความเข้มแสงหลังผ่านแผ่นวิเคราะห์แสงโพลาไรซ์

เนื่องจากแผ่นทำแสงโพลาไรซ์ยอมให้เฉพาะองค์ประกอบส่วนหนึ่งผ่าน แต่ไม่ยอมให้อีกองค์ประกอบที่ตั้งฉากกับตัวทำแสงโพลาไรซ์ผ่าน ดังนั้นความเข้มแสงที่ตกกระทบแผ่นทำแสงโพลาไรซ์จึงเท่ากับ $2I_0$

โพลาไรซ์เนื่องจากการสะท้อน



รูปที่ 6.48 การทำแสงโพลาไรซ์เนื่องจากการสะท้อน

จากรูป แสงไม่โพลาไรซ์ตกกระทบผิวของตัวกลางหักเหแล้วทำให้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์ มุมที่ทำให้แสงสะท้อนเป็นแสงโพลาไรซ์เรียกว่า มุมโพลาไรซ์ (θ_p) และแสงสะท้อนกับแสงหักเหจะตั้งฉากกันพอดี

จากกฎของสเนล

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \theta_2$$

$$1 \sin \theta_p = n \sin \theta'$$

แต่

$$\theta_r + \theta' = 90^\circ = \theta_p + \theta'$$

$$\theta' = 90^\circ - \theta_p$$

$$\sin \theta_p = n \sin(90^\circ - \theta_p)$$

$$\sin \theta_p = n \cos \theta_p$$

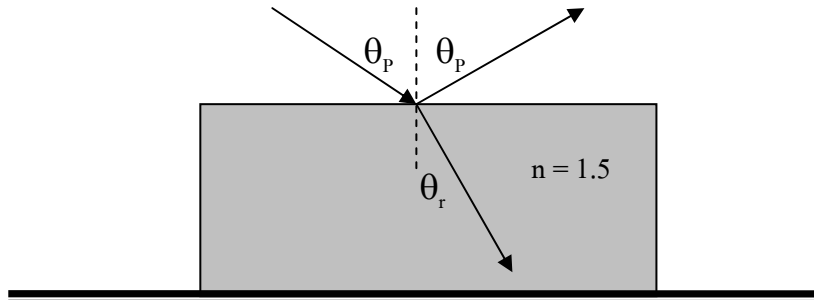
$$n = \tan \theta_p$$

(6.74)

สมการที่ 6.81 เรียกว่า กฎของบรูว์สเตอร์

ตัวอย่างที่ 6.16 ถ้าต้องการจะใช้แผ่นแก้วที่มีค่าดัชนีหักเห 1.5 เป็นตัวโพลาไรเซอร์ มุมโพลาไรซ์จะเป็นเท่าใด และมุมหักเหจะเป็นเท่าใด

วิธีทำ



จากกฎของบรูสเตอร์ $n = \tan \theta_p$

จะได้ว่า $\tan \theta_p = 1.5$

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

นั่นคือ มุมโพลาไรซ์ เท่ากับ 56.3°

และ $\theta_p + \theta_r = 90^\circ$

นั่นคือ $\theta_r = 90^\circ - 56.3^\circ = 33.7^\circ$

บทสรุป

อัตราเร็วของแสง

อัตราเร็วของแสงมีค่าเท่ากับ $299,792,459 \pm 0.8$ เมตรต่อวินาที หรือค่าโดยประมาณที่ใช้คือ 3×10^8 เมตรต่อวินาที

การส่องสว่าง

ความเข้มของการส่องสว่าง

$$I = \frac{F}{\Omega}$$

เมื่อ F แทนฟลักซ์ของการส่องสว่าง (Lumens : lm)

I แทนความเข้มของการส่องสว่าง (Candelas : cd)

Ω แทนมุมตัน (Steradians : sr)

ความสว่าง

$$E = \frac{F}{A}$$

เมื่อ F แทนฟลักซ์ของการส่องสว่าง (Lumens : lm)

E แทนความสว่าง (Lux)

A แทนพื้นที่ที่ปริมาณฟลักซ์ของการส่องสว่างตกกระทบบนตั้งฉากกับผิววัตถุ (m^2)

การสะท้อนของแสง

หลักการเกี่ยวกับการสะท้อนของแสง สรุปได้ดังนี้

- รังสีตกกระทบบ รังสีสะท้อน และเส้นปกติ จะต้องอยู่บนระนาบเดียวกัน
- มุมสะท้อน θ_i จะเท่ากับมุมตกกระทบบ θ_r เสมอ นั่นคือ $\theta_i = \theta_r$

การเกิดภาพเนื่องจากการสะท้อนที่ผิวของกระจกเงาราบ

การสะท้อนบนเงาราบสรุปได้ว่า

ก. ระยะภาพ (s') เท่ากับระยะวัตถุ (s) ($s' = s$)

ข. ขนาดภาพ (y') เท่ากับขนาดวัตถุ (y) ($y' = y$)

การเกิดภาพที่เกิดจากการสะท้อนบนกระจกเงาโค้ง

สมการที่ใช้ในการคำนวณเกี่ยวกับกระจกเงาโค้ง คือ

$$\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f}$$
$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{S'}{S} = \frac{f - S'}{f} = \frac{-f}{S - f}$$

การสะท้อนกลับหมด

สูตรที่ใช้คำนวณเกี่ยวกับการสะท้อนกลับหมด

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

การหักเหของแสง

สูตรที่ใช้คำนวณการหักเหของแสงผ่านผิวรอยต่อราบ

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

ความลึกปรากฏ

$$\frac{S'}{S} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\text{ลึกปรากฏ}}{\text{ลึกจริง}}$$

การเกิดภาพเนื่องจากการหักเหที่ผิวโค้ง

สมการคำนวณเกี่ยวกับการเกิดภาพเนื่องจากการหักเหที่ผิวโค้ง

$$\frac{n_1}{S} + \frac{n_2}{S'} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

กำลังขยายของภาพ

$$m = n_1 \left(\frac{y}{S} \right) = n_2 \left(\frac{-y'}{S} \right)$$

เลนส์บาง

สมการของช่างทำเลนส์

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

สมการของเลนส์บาง คือ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'}$$

กำลังขยายของเลนส์

$$m = -\frac{S'}{S}$$

การแทรกสอดของแสง

การแทรกสอดของแสงจากช่องแคบคู่

สมการแถบสว่าง (ตรงกลางเป็นแถบสว่าง) คือ $d \sin \theta = m\lambda$ หรือ

$$d \left(\frac{y}{D} \right) = \left(m - \frac{1}{2} \right) \lambda \quad \text{เมื่อ} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

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

$$d \left(\frac{y}{D} \right) = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad \text{เมื่อ} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

การแทรกสอดโดยการสะท้อนหรือการส่งผ่านบนฟิล์มบาง

กรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่ำกว่าไปสู่ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่า

$$\text{สมการแถบสว่าง คือ } 2dn = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad \text{เมื่อ} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{สมการแถบมืด คือ } 2dn = m\lambda \quad \text{เมื่อ} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

กรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าไปสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากกว่าคลื่นที่สะท้อนจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180 องศา

$$\text{สมการแถบมืด } 2dn = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda \quad \text{เมื่อ} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\text{สมการแถบสว่าง } 2dn = m\lambda \quad \text{เมื่อ} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

การเลี้ยวเบนของแสง

การเลี้ยวเบนผ่านช่องสลิตคู่

สมการแถบสว่าง คือ $a \sin \theta = m\lambda$ เมื่อ a คือระยะห่างระหว่างช่องสลิต และ
 $m = 0, 1, 2, \dots$

สมการแถบมืด คือ $b \sin \theta = m\lambda$ เมื่อ b คือความกว้างของช่องสลิต และ
 $m = 1, 2, 3, \dots$

การเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง

สมการแถบสว่าง คือ $a \sin \theta = m\lambda$ เมื่อ a คือระยะห่างระหว่างช่อง และ
 $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

สมการแถบมืด $b \sin \theta = m\lambda$ เมื่อ b คือความกว้างของ 1 ช่องเกรตติง (1 เส้น
เกรตติง) และ $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

กำลังแยกของเกรตติง (R)

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

เมื่อ N คือจำนวนช่องของเกรตติง

m คือลำดับของแถบสว่าง

λ คือความยาวคลื่นเฉลี่ย

$\Delta\lambda$ คือความแตกต่างระหว่างความยาวคลื่นทั้งสอง

โพลาไรเซชัน


กฎของมาลุส

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

กฎของบรูว์สเตอร์

$$n = \tan \theta_p$$

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

