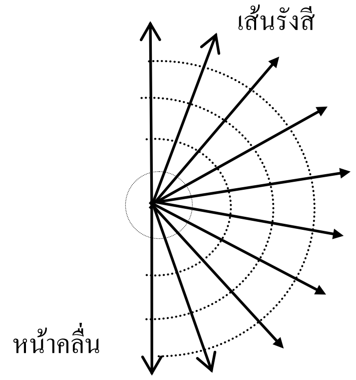
**บทที่ 16 ทัศนศาสตร์**

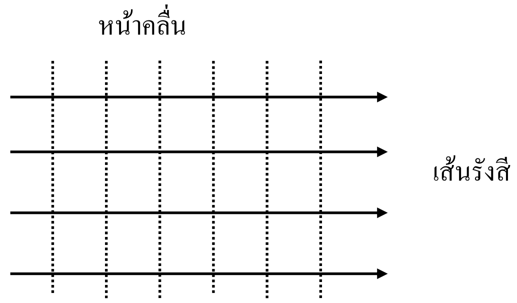
ทัศนศาสตร์แบ่งเป็นทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตและทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ โดยที่ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตเป็นกาศึกษาเรื่องของแสงที่เกี่ยวกับปรากฏการณ์ในระดับมหภาคซึ่งประกอบด้วยหัวข้อสำคัญคือการสะท้อนแสง(Reflection) ดัชนีหักเหแสง(Index of Refraction)กฎของสเนล(Snell’s Law for Refraction)การสะท้อนกลับหมดภายใน(Total Internal Reflection)เป็นต้น ส่วนทัศนศาสตร์เชิงกายภาพเป็นการศึกษาเกี่ยวกับปรากฏการณ์ในระดับจุลภาคที่ระดับใกล้เคียงความยาวคลื่นแสง เช่น การเลี้ยวเบน และการแทรกสอดของแสงเป็นต้น

ในบทก่อนได้กล่าวถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางสุญญากาศ ในบทนี้จะกล่าวถึงในตัวกลางอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งคลื่นแสงในตัวกลางโปร่งแสง ถ้าพิจารณา $k$ ในสมการของแมกซ์เวล( Maxwell’s Equations ) จะเกี่ยวข้องกับดัชนีหักเหแสง(index of refraction) $n$ อย่างไร

ในคลื่นแสงมีข้อกำหนดเกี่ยวกับอันตรกิริยากับสิ่งอื่นต่อเมื่อความยาวคลื่นแสงจะต้องสั้นกว่าวัตถุที่คลื่นแสงมีอันตรกิริยาด้วย ดังนั้นเมื่อสมมติว่าแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงมีแนวเส้นทางการเคลื่อนที่เรียกว่ารังสี(rays)



แหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ใกล้

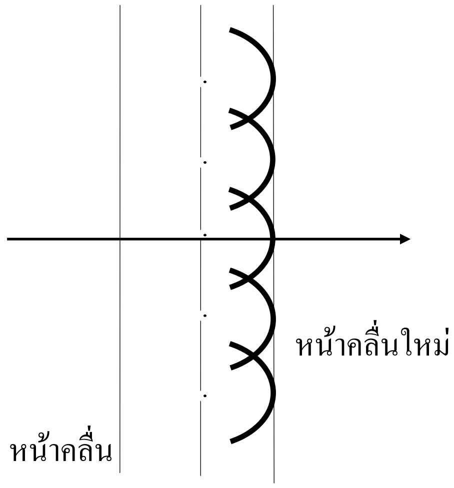


แหล่งกำเนิดคลื่นอยู่ไกลมากๆ เส้นรังสีขนานกับ

รูปที่ 16.1 แสดงเส้นรังสีแสง

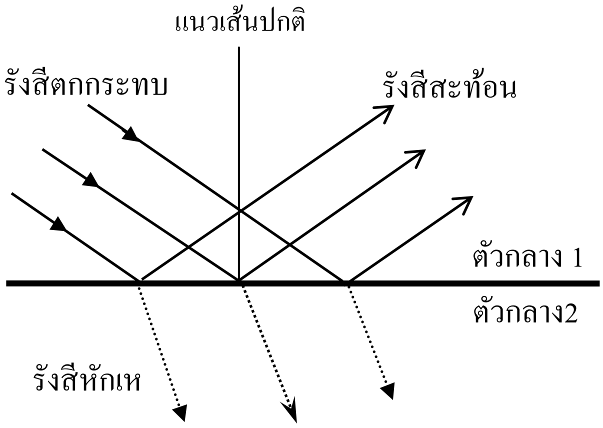
**หลักของฮอยเกนส์(Huygen’s principle)**

ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นอาจถือว่าเป็นต้นกำเนิดคลื่นทุติยภูมิ(หรือหน้าคลื่นใหม่) ซึ่งเคลื่อนที่แผ่ออกไปทุกทิศทางด้วยความเร็วเท่าเดิมในตัวกลางเดิม

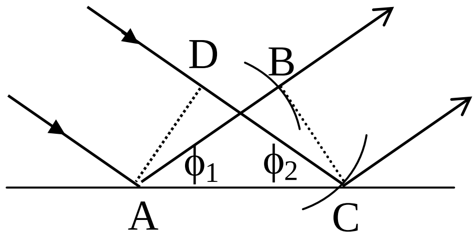



รูปที่ 16.2 แสดงหลักของฮอยเกนส์

จุดสนใจของการศึกษาอยู่ที่การสะท้อนและการหักเห (REFLECTION and REFRACTION) ตรงรอยต่อของสองตัวกลางดังรูป เส้นที่ตั้งฉากกับแนวเส้นรังสีในรูปกำหนดให้เป็นความยาวคลื่น ส่วนเส้นที่ตั้งฉากกับรอยต่อตัวกลางจะเรียกว่าแนวเส้นปกติ การกำหนดเช่นนี้จะทำให้การศึกษาปรากฏการณ์การสะท้อนและหักเหได้ง่ายขึ้น

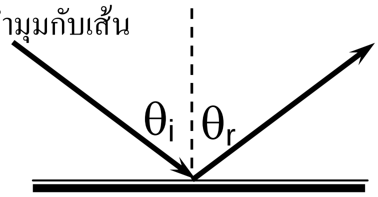



## 16.1 การสะท้อนของคลื่นแสง(Reflection)




รูปที่ 16.3 แสดงการสะท้อนแสง

พิจารณามุมของเส้นรังสีที่ตกกระทบรอยต่อตัวกลางจะพบว่าขณะที่เส้นรังสีเส้นสะท้อนเส้นแรกเคลื่อนที่ไปได้หนึ่งความยาวคลื่น รังสีตกกระทบเส้นที่สองจะเริ่มสะท้อนออกพอดี ดังนั้น AB=DC เท่ากับความยาวคลื่น และเนื่องจากระยะห่างเส้นรังสีคงตัว AD=BC ดังนั้น $\sin\phi_1 = \dfrac{BC}{AC}$ และ $\dfrac{AD}{AC} = \sin\phi_2$ ซึ่งได้ $\sin\phi_1 = \sin\phi_2$ หรือ $\phi_1 = \phi_2$ และเมื่อกำหนดให้เส้นรังสีตกกระทบทำมุมมุมกับเส้นปกติเป็น $\theta_i$ ส่วนเส้นรังสีสะท้อนทำมุมกับเส้นปกติเป็น $\theta_r$ ดังรูปและใช้ผลของ $\phi_1 = \phi_2$ จะได้ $\theta_i = \theta_r$ ด้วยหรือมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน โดยวัดเทียบกับแนวเส้นปกติดังรูปเรียกว่ากฎการสะท้อนแสง

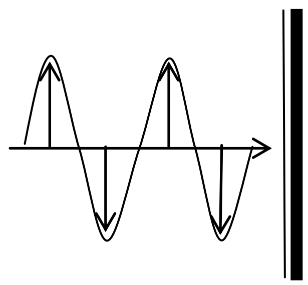



รูปที่ 16.4 แสดงมุตกกระทบและมุมสะท้อน

นอกจากนี้ยังอาจพิจารณาได้จากสนามไฟฟ้าของแสงได้โดยพิจารณาคลื่นตกกระทบตัวนำในแนวตั้งฉากคือ

$$E_\mu = E_x \cos(kz - \omega t)$$

เพื่อให้เข้าใจหลักการได้ง่ายขึ้นลองพิจารณาตัวกลางตกกระทบที่เป็นโลหะพบว่าเมื่อมีสนามไฟฟ้าตกกระทบอิเล็กตรอนบนผิวโลหะได้รับแรงกระทำ *F=eE* จึงมีความเร่งและเกิดการสั่นในแนวขวาง จึงเกิดแผ่รังสีในแนวแกน $\pm z$ โดยหลักการรวมคลื่น(superposition) จะพบว่า



รูปที่ 16.5 คลื่นแสงตกกระทบตัวกลาง

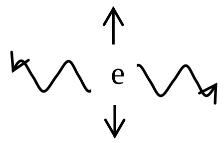
(total field) = (incident field) + (reradiated field).

$E_{total} = E_{incident} + E_{reradiated}$

ในตัวนำสนามไฟฟ้าจะเป็นศูนย์จึงทำให้

$E_{total} = E_{incident} + E_{reradiated} = 0$

ดังนั้น $E_{incident} = -E_{reradiated}$




รูปที่ 16.6 การปลดปล่อยคลื่นแสงของตัวกลาง

**กรณีที่ไม่ตั้งฉาก** สนามไฟฟ้าในแนวขนานกับระนาบตกกระทบ(ตามแนวแกน x) หักล้างกันทั้งสนามตกกระทบและสะท้อน คือ

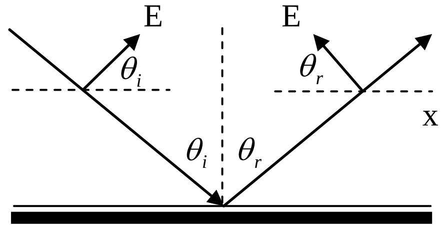
$E_{ix} + E_{rx} = 0$

$E_{ix} = E_i \cos\theta_i$

$E_{rx} = E_r \cos\theta_r$

จาก $E\cos\theta_i = E\cos\theta_r$

ดังนั้น $\theta_i = \theta_r$




รูปที่ 16.7 สนามไฟฟ้าของคลื่นแสงในตัวกลาง

**16.2 การหักเหแสงและดัชนีหักเหแสง(Index of Refraction)**

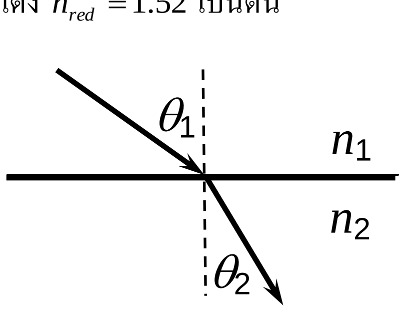
คลื่นตกกระทบบนรอยต่อตัวกลางไม่เพียงแต่มีคลื่นสะท้อนเท่านั้นยังมีคลื่นส่วนหนึ่งที่เคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางที่สอง อาจคำนวณอัตราเร็วในอากาศได้จากสมการความเร็วแสงที่ได้มาจากสมการของ Maxwell ในสุญญากาศ $c = \dfrac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$ แต่ความเร็วคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางอื่นๆ แตกต่างกับในสุญญากาศ และเมื่อพิจารณาความแตกต่างของตัวกลางทั่วไปกับตัวกลางสุญญากาศจะพบว่า $\varepsilon = \kappa\varepsilon_0$ โดยที่ $\kappa$ เป็นค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ ส่วนค่า $\mu \approx \mu_0$ ดังนั้น $v = \dfrac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \approx \dfrac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0\kappa}} = \dfrac{c}{\sqrt{\kappa}}$ ถ้ากำหนดให้ $\sqrt{\kappa} \cong n$ เป็นค่าคงที่ของอัตราส่วนความเร็วแสงในสุญญากาศต่อความเร็วแสงในตัวกลางหนึ่งๆ ($n = \dfrac{c}{v}$)ซึ่งขึ้นกับชนิดของตัวกลางจะมีค่ามากกว่าหนึ่งจึงทำให้ความเร็วของแสงในตัวกลลางต่างๆ มีค่าน้อยกว่าในตัวกลางสุญญากาศ นิยาม n ว่าเป็นดัชนีหักเหแสง ดังนั้นความเร็วของแสงในตัวกลางต่างๆ จะหาได้จาก $v = \dfrac{c}{n}$ เมื่อ $n$ =ดัชนีหักเหแสง(index of refraction)ของวัสดุต่างๆ ตัวอย่างเช่นพวกแก้ว(glass)ดัชนีหักเหแสงสำหรับสีนำเงินคือ $n_{blue} = 1.53$ และสำหรับแสสีแดง $n_{red} = 1.52$ เป็นต้น

**กฎการหักเหแสงในตัวกลางต่างๆ**

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความสัมพันธ์รังสีตกกระทบกับรังสีหักเหในตัวกลางคู่ต่างโดยพิจารณาจากมุมตกกระทบและมุมหักเห

จากสมการ $v = \lambda f$

อัตราเร็วต่างกันในสองตัวกลางแต่ความถี่เท่ากัน



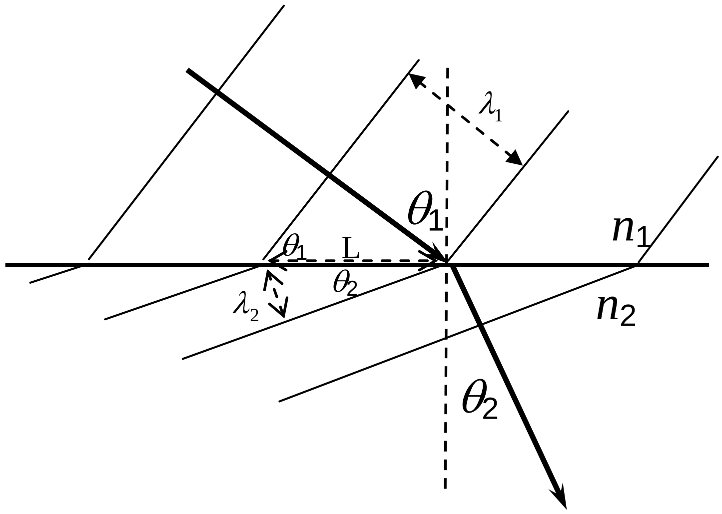

รูปที่ 16.8 การหักเหแสงตัวกลาง

ในทั้งสองตัวกลางดังนั้น $\frac{v_1}{\lambda_1} = \frac{v_2}{\lambda_2}$

หรือ $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2}$

หรือ $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$

พิจารณารูปสามเหลี่ยมมุมฉากสองรูปที่เกิดจากการพิจารณาการหักเหของแสงผ่านตัวกลางในรูปนี้ ซึ่งจะพบว่าที่มีด้านตรงข้ามมุมฉากL ร่วมกันจึงทำให้




$$L = \frac{\lambda_1}{\sin\theta_1} = \frac{\lambda_2}{\sin\theta_2}$$

รูปที่ 16.9 กฎของสเนล

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

สมการความสัมพันธ์นี้เรียกว่ากฎของสเนล(Snell's Law) และเมื่อพิจารณาต่อไปโดยใช้สมการสัดส่วนความยาวคลื่นทั้งสองสมการข้างต้นจะได้ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{n_2}{n_1}$ หรือ

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

**ตัวอย่าง 1.** แสงจากตัวกลางอากาศที่มีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1 ตกกระทบรอยต่อตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสง n ด้วยมุมมุ 37 องศากับแนวปกติ และเกิดการหักเหไปในตัวกลางด้วยมุม 30 องศากับแนวเส้นปกติ จงหาว่าดัชนีหักเหแสง n มีค่าเป็นเท่าใด

วิธีทำ สมการ $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ จะได้

$$1\sin 37^0 = n\sin 30^0$$

$$n = \frac{\sin 37^0}{\sin 30^0} = \frac{3/5}{1/2} = \frac{6}{5} = 1.2$$

จากกฎของสเนลล์เป็นที่น่าสังเกตว่าแสงจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหน้อยเมื่อหักเหผ่านตัวกลางที่ 2 ที่มีดัชนีหักเหแสงมากกว่าแหแนวเส้นรังสีจะเบนเข้าหาเส้นปกติคือมุมหักเหน้อยกว่ามุมตกกระทบ ในทางตรงข้ามถ้าแสงจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเหสูงกว่าเกิดหักเหไปในตัวกลางที่มีดัชนีหักเหแสงน้อยกว่าแนวเส้นรังสีหักเหจะเบนออกจากเส้นปกติคือมุมหักเหแสงจะมากกว่ามุมตกกระทบ

**ตัวอย่าง 2** การหักเหแสงผ่านยอดปริซึมที่มีมุมยอด $\phi$ ดังรูป จงหาค่าดัชนีหักเหแสง

วิธีทำ การหักเหแสงที่ยอดปริซึมจะเกิดขึ้นสองครั้งคือครั้งแรกในตัวกลางปริซึมและครั้งที่สองจากตัวกลางปริซึมหักเหไปในตัวกลางอากาศ การหักเหเกิดขึ้นเมื่อมุมเบี่ยงเบนจากแนวเดิมของแสงเข้า $\delta_{\min}$ เป็นค่าน้อยสุด จากรูปจะได้

$$2\alpha + x = 180^0 = x + \delta_{\min}$$

หรือ $\alpha = \dfrac{\delta_{\min}}{2}$

และเมื่อพิจารณามุมยอดของปริซึมกับมุมหักเหในตัวกลางจะได้สามเหลี่ยมมุมฉากสองสามเหลี่ยมในรูปล่าง

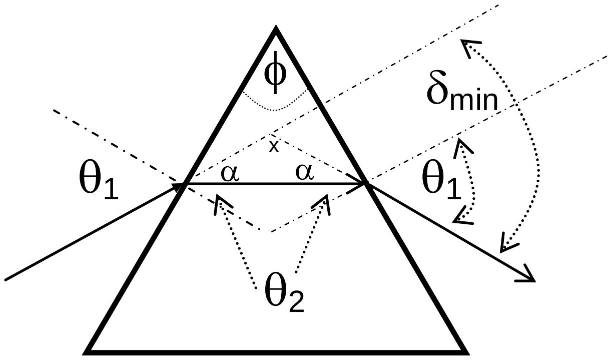
จะได้ $\theta_2 = \dfrac{\phi}{2}$

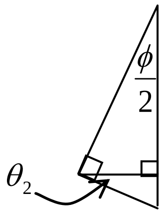
จากรูปบน $\theta_1 = \theta_2 + \alpha = \dfrac{\phi + \delta_{\min}}{2}$

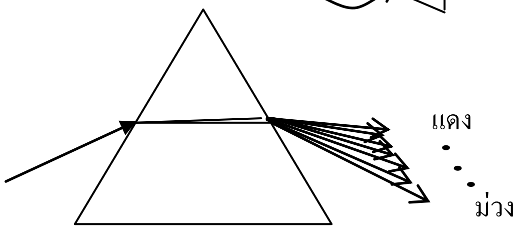
และจาก $1\sin\theta_1 = n\sin\theta_2$

หรือ $\sin\dfrac{\phi + \delta_{\min}}{2} = n\sin\dfrac{\phi}{2}$

ดังนั้น $n = \dfrac{\sin\dfrac{\phi + \delta_{\min}}{2}}{\sin\dfrac{\phi}{2}}$



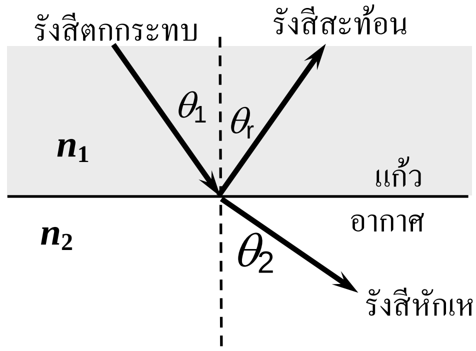




รูปที่ 16.10 การหักเหแสงผ่านยอดปริซึม

การหักเหแสงที่ยอดปริซึมจะทำให้เกิดการแยกลำแสงสีต่างๆ ออกมาทั้งนี้เพราะความเร็วของแสงสีต่างๆ ไม่เท่ากันเมื่อหักเออกสู่อากาศอีกครั้งจึงเกิดการแยกลำแสงสีต่างๆ ออกมาเห็นได้ชัดเจน ดังรูป

**การสะท้อนกลับหมด(Total Internal Reflection)**

พิจารณารังสีแสงตกกระทบในตัวกลางที่มีดัชนีหักแสงสูงกว่าตัวกลางหักเห ดังรูป แสงจากตัวกลางแก้วตกกระทบที่รอยต่อแก้วกับอากาศจะมีแสงบางส่วนสะท้อนกลับไปในตัวกลางเดิมและบางส่วนหักเหผ่านออกไปในอากาศโดยมีมุมหักเหเบนออกจาเส้นปกติโดยมีมุมหักเหมากกว่ามุมตกกระทบ $\theta_2 > \theta_1$



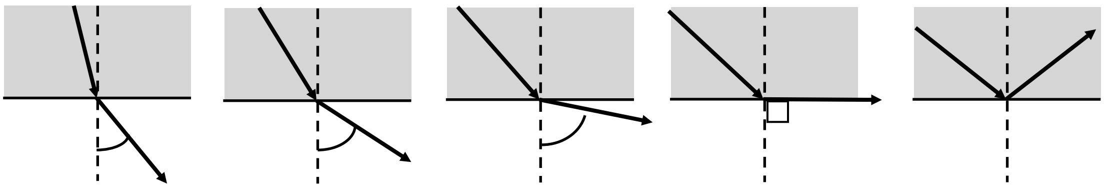

รูปที่ 16.11การสะท้อนกลับหมด

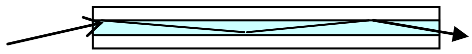
เมื่อมุมตกกระทบกาออกมากขึ้นมุมหักเหก็จะเบนออกจากเส้นปกติมากขึ้นตามไปด้วย จนเมื่อมุมหักเหเท่ากับหรือ 90 องศา (โดยที่มุมตกกระทบมีค่าน้อยกว่ามุม90 องศา) จะทำให้แสงหักเหออกไปในตัวกลางอากาศเป็นศูนย์หรือไม่หักเหออกมาเลยจะเรียกมุมตกกระทบที่ทำให้รังสีแสงหักเหเท่ากับ 90 องศานี้ว่ามุมวิกฤติ $\theta_c$ ซึ่งมุมตกกระทบที่มากกว่านี้จะทำให้แสงสะท้อนกลับหมดในตัวกลางเดิมจากสมการ $n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2$

โดยที่ $\theta_1 = \theta_c$ และ $\theta_2 = 90^0$ ดังนั้น $\sin\theta_c = \dfrac{1\sin 90^0}{n_1} = \dfrac{1}{n}$ และจะหามุมวิกฤติจะหาได้จาก

สามการ $$\theta_c = \sin^{-1}\frac{1}{n}$$

ดังนั้นการสะท้อนกลับหมดในตัวกลางแก้วที่มีดัชนีหักเหแสงเท่ากับ 1.5 มุมตกกระทบในตัวกลางแก้วสู่อากาศจะต้องมากกว่า $\theta_c = \sin^{-1}\dfrac{1}{1.5}$ หรือมากว่า 41.8 องศา





ใยแก้วนำแสงที่ใช้ในการสื่อสารก็ใช้หลักการสะท้อนกลับหมดเช่นกัน โดยใยแก้วนำแสงประกอบด้วยสองส่วนสำคัญคือแกน(core) ที่มีดัชนีหักเหแสงสูงรอบนอกแกนจะเป็นแคลดดิ้ง(cladding) ซึ่งจะมีดัชนีหักเหแสงน้อยกว่าดังนั้นเมื่อมุมตกกระทบแสงภายในแกนกางมากๆ แสงจะส่งผ่านไปได้โดยไม่หักเหออกมาในแคลดดิ้ง

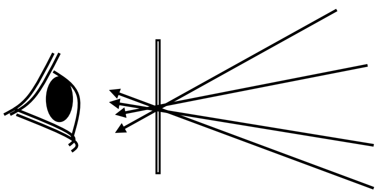
รูปที่ 16.12 มุมหักเหและใยแก้วนำแสง

ในธรรมชาติก็มีหลักการสะท้อนกลับหมด เช่นภาพลวงตาที่เกิดขึ้นกับนักดำน้ำลึก(Diver's illusion) มองเห็นแสงด้านบนเป็นรูปกรวยกลม

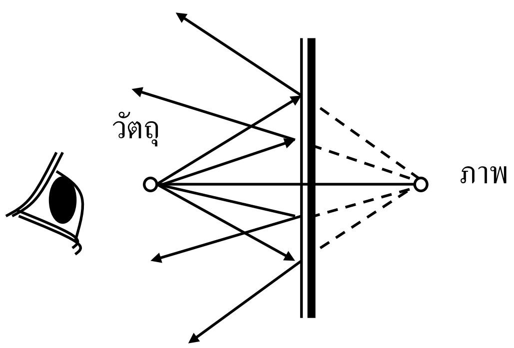
การมองเห็นแสงรุ้งหลังฝนตกจัดเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการสะท้อนและเกิดการหักเหแสงภายในละอองน้ำ ซึ่งสามารถอ่านเพิ่มเติมได้จากเอกสารฟิสิกส์ทั่วไป

**16.3 ภาพจากกระจก**

มีแสงสะท้อนจากวัตถุมาเข้าตาเราในระดับความเข้มแสงที่แตกต่างกันเราจึงเห็นวัตถุ เมื่อมองในกระจกหรือฉากสิ่งที่เห็นคือภาพของวัตถุ อาจแบ่งภาพได้สองแบบคือ ภาพจริง เป็นภาพที่เกิดจากการตัดกันของรังสีแสงจริง ส่วนภาอีกแบบหนึ่งคือภาพเสมือน เป็นภาพที่เสมือนว่าเกิดการตัดกันของรังสีแสงแต่มิได้เกิดการตัดกันจริงๆ โดยทั่วเป็นภาพที่เห็นจากกระจกราบจะเกิดการกลับซ้ายเป็นขวาและขวาเป็นซ้ายเสมอ



ภาพจริงบนฉาก



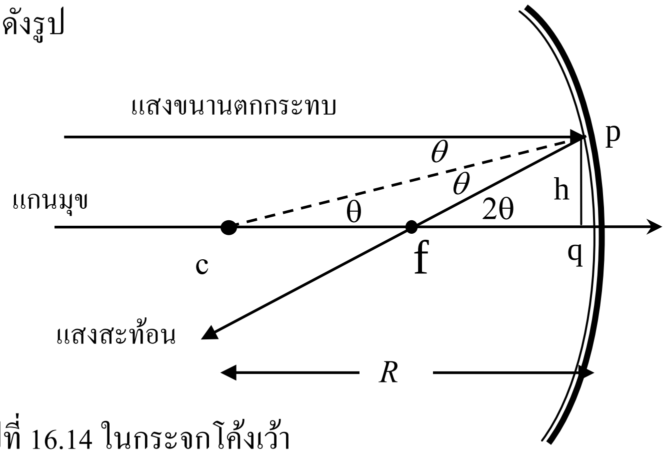

รูปที่ 16.13 ภาพและการเห็นภาพ

ภาพเสมือน

**ภาพจากกระจกโค้ง**

กระจกโค้งมีสองแบบคือโค้งเว้า(Concave)และโค้งนูน(Convex) กระจกโค้งเว้าจะได้โฟกัสจากแสงตัดกันจริงที่ด้านหน้าเรียกว่าโฟกัสจริงจะมีค่าเป็นบวก ส่วนกระจกโค้งนูนโฟกัสไม่ได้จากการตัดกันจริงเรียกว่าโฟกัสเสมือน(virtual focal point) ความสัมพันธ์ของโฟกัสและรัศมีของกระจกหาได้จากการพิจารณาแผนภาพดังรูป

ตามหลักตรีโกณมิติสามเหลี่ยม cpq และ fpq สามารถพิสูจน์ได้ว่ามุมของเส้นรังสีแสงสะท้อนทำมุมกับแกนมุขสำคัญเป็น $2\theta$ และถ้า $\theta$ เป็นมุมน้อยๆ แล้ว $\tan\theta \approx \sin\theta \approx \theta$ ดังนั้น $\theta \approx \dfrac{h}{R}$ และได้ $2\theta \approx \dfrac{h}{f}$




รูปที่ 16.14 ในกระจกโค้งเว้า

จึงสรุปได้ว่าโฟกัสเป็นครึ่งหนึ่งของรัศมีความโค้ง $f = \dfrac{R}{2}$

**หลักการเขียนแผนภาพที่สะท้อนบนกระจกโค้ง**

Robert Smith ได้ค้นพบว่าถ้าวัตถุอยู่ไกลเป็นระยะอนันต์ภาพจะเกิดขึ้นเป็นจุดที่โฟกัสมาตั้งแต่ปี 1735 และได้ใช้เป็นแนวในการกำหนดหลักการเขียนแผนภาพเรียกว่า ray diagram ดังนี้

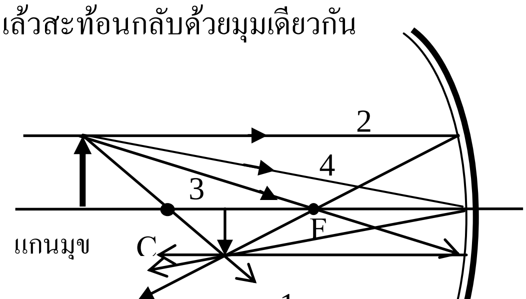
1. เส้นสะท้อนจากเส้นรังสีตกกระทบที่อยู่บนแนวรัศมีจะเป็นเส้นทางเดียวกับเส้นตกกระทบแต่สวนทิศทางกัน

2. เส้นรังสีแสงขนานเมื่อตกกระทบกระจกโค้งเกิดการสะท้อนแล้วแนวเส้นรังสีสะท้อนจะตัดผ่านโฟกัส

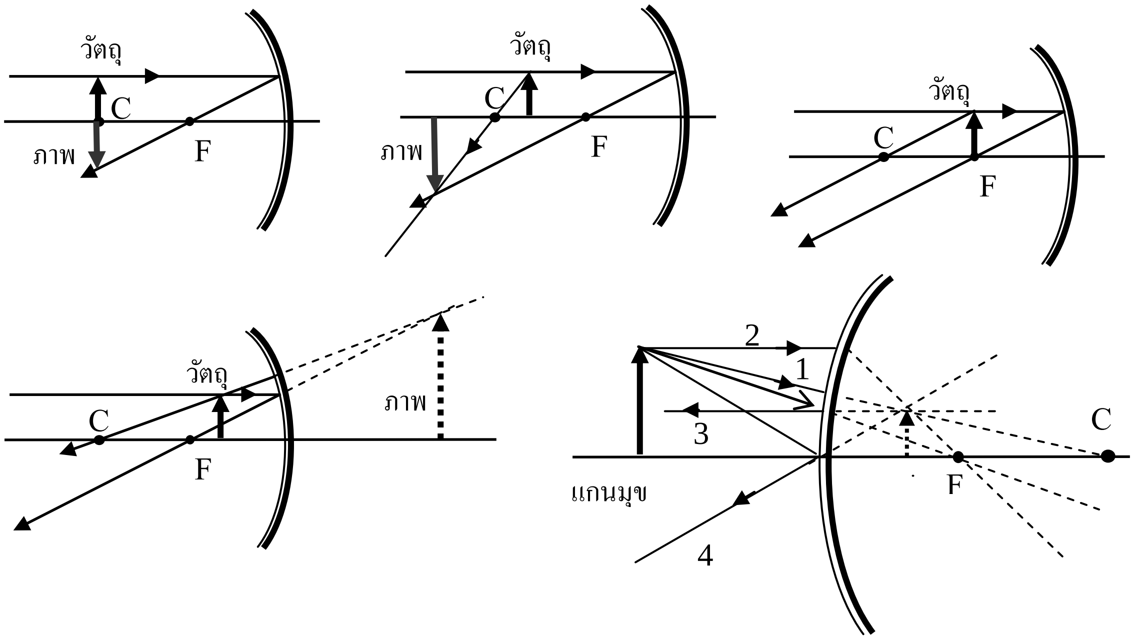
3. เส้นรังสีที่ผ่านจุดโฟกัสเมื่อตกกระทบผิวโค้งแล้วจะเป็นเส้นขนานกับแกนมุข (principal ray)

4. เส้นรังสีแสงที่ตกกระทบตรงจุดกึ่งกลางกระจกแล้วสะท้อนกลับด้วยมุมเดียวกัน

นอกจากนี้ยังมีข้อตกลงในการเขียนแผนภาพ เช่น เส้นรังสีมักเขียนจากจุดที่ห่างออกไปจากเส้นแกนมุขและจะทำมุมกันอย่างไรก็ได้ ในภาพจริงจะเขียนด้วยเส้นทึบ ส่วนภาพเสมือนจะเขียนด้วยเส้นประ ในการเขียนเส้นต่างๆ ตามหลักการจะเพียงพอสำหรับการกำหนดตำแหน่งของภาพจากตำแหน่งวัตถุที่กำหนด ดังตัวอย่างในรูป




รูปที่ 16.15 การเกิดภาพในกระจกโค้งเว้า




รูปที่ 16.16 ภาพในกระจกโค้งเว้าแบบต่างๆ

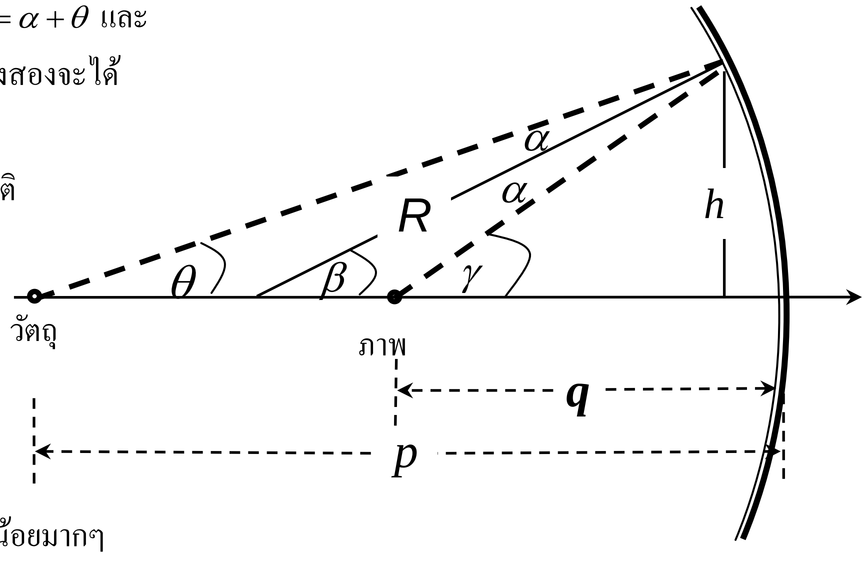
**สมการของกระจก**

ต่อไปนี้เราจะแปลงรูปทรงเรขาคณิต ไปเป็นสมการพีชคณิตให้สมการอยู่ในรูปตัวแปรของระยะวัตถุ p ระยะภาพ q และระยะโฟกัส f อาจเริ่มพิจารณาจากกระจกเว้าที่มีระยะโฟกัสเป็นบวกก่อน และกำหนดวัตถุเป็นจุด ดังรูป จะพบว่า $\beta = \alpha + \theta$ และ $\gamma = 2\alpha + \theta$ จากสมการทั้งสองจะได้ $\gamma = 2\beta - \theta$

จากความสัมพันธ์ตรีโกณมิติที่กำหนดว่าถ้ามุม $\theta$ น้อยๆ จะได้

$\tan\theta \approx \sin\theta \approx \theta$

จากรูปเนื่องจากกระจกโค้งรัศมีมากเมื่อเทียบกับระยะ h มุม $\gamma, \beta, \theta$ จึงน้อยมากๆ




จึงได้ $\gamma \approx \dfrac{h}{q}$ และ $\beta \approx \dfrac{h}{R}$ และ $\theta \approx \dfrac{h}{p}$

รูปที่ 16.17 สมการของกระจกโค้งเว้า

ดังนั้น $\dfrac{h}{q} = \dfrac{2h}{R} - \dfrac{h}{p}$ เมื่อหารตลอดด้วย h และใช้ความสัมพันธ์ของรัศมีและโฟกัสจะได้สมการสำหรับกระจกเว้าดังนี้ $\dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{q} = \dfrac{1}{f}$ ถ้าลองทำแบบเดียวกันนี้กับกระจกโค้งนูนจะได้

สมการ $\frac{1}{p}-\frac{1}{q}=-\frac{1}{f}$ ในกระจกโค้งนูนจะได้ภาพเสมือนที่เป็นเครื่องหมายลบเสมอ ในขณะที่โฟกัสก็เป็นลบเสมอดังนั้นสมการของกระจกโค้งนูนและโค้งเว้าจึงเป็นสมการเดียวกันคือ

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}$$

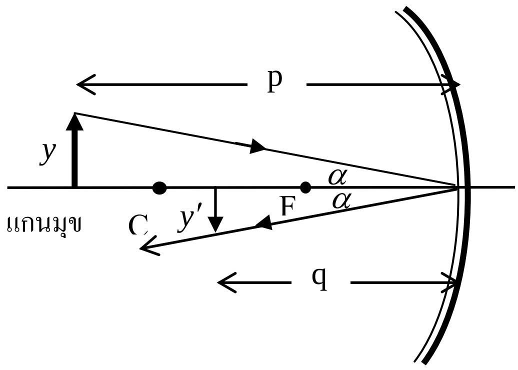
โดยกำหนดว่าเมื่อใช้สำหรับโค้งนูนระยะภาพและระยะโฟกัสเป็นลบ

**กำลังขยายเชิงเส้นของกระจก**

กำหนดให้ความสูงของวัตถุเป็น $y$ และให้ความสูงของภาพเป็น $y'$ ดังภาพ กำลังขยายจึงหาได้จากขนาดของภาพหารด้วยขนาดของวัตถุ $m=\frac{y'}{y}$

จากรูปพิจารณาที่มุมตกกระทบและมุมสะท้อน

จะได้ $\tan\alpha=\frac{y}{p}=\frac{y'}{q}$ ดังนั้น $\frac{y'}{y}=\frac{q}{p}$




รูปที่ 16.18 กำลังขยายภาพในกระจกโค้งเว้า

จึงส่งผลให้ได้สมการกำลังขยายสำหรับกระจกเว้าคือ $m=\frac{y'}{y}=-\frac{q}{p}$

เครื่องหมายลบมาจากขนาดวัตถุที่เป็นแบบหัวกลับ ดังนั้นถ้ากำลังขยายเป็นบวกแสดงว่าเป็นหัวตั้ง ส่วนถ้ากำลังขยายเป็นลบแสดงว่าได้ภาพหัวตั้ง สมการกำลังขยายนี้ใช้ได้กับทั้งกระจกนูนและกระจกเว้า

ตัวอย่าง 3 วัตถุสูง 1.2 cm วางห่าง 2 cm กระจกโค้งรัศมี 8 cm จงหาตำแหน่งและขนาดของภาพเมื่อ ก.) เป็นกระจกโค้งเว้า ข.) เป็นกระจกโค้งนูน

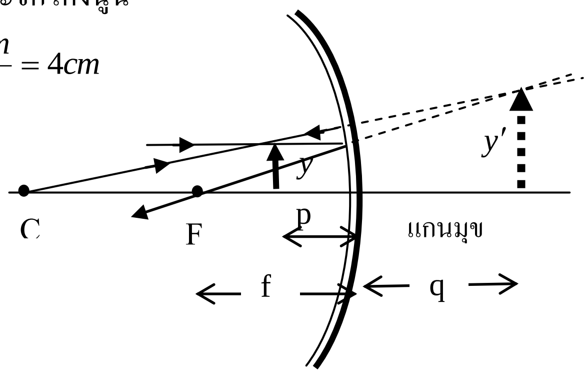
วิธีทำ ก.)หาโฟกัสจากสมการ $f=\frac{R}{2}=\frac{8cm}{2}=4cm$

และใช้ระยะวัตถุที่กำหนดให้ 2 cm

หาระยะภาพจากสมการของกระจกดังนี้

$$\frac{1}{2cm}+\frac{1}{q}=\frac{1}{4cm}$$

ได้ $q=\frac{-2cm\times 4cm}{4cm-2cm}=-4cm$




หากำลังขยายจากสมการ $m=-\frac{q}{p}=-\frac{-4cm}{2cm}=+2$

รูปที่ 16.19 ภาพของตัวอย่างที่3

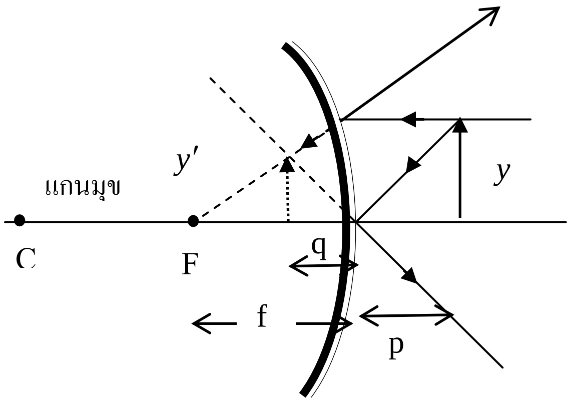
จากผลที่ได้แสดงว่าเป็นภาพหัวตั้งขนาดเป็นสองเท่าของวัตถุ มีระยะภาพเป็นลบ จึงเป็นภาพเสมือนหัวตั้งเกิดด้านหลังกระจกดังรูป และหาขนาดภาพได้เท่ากับ $y'=2\times 1.2cm=2.4cm$

ข.) กรณีกระจกนูนโฟกัสเป็นลบ $f = -4cm$

และหาระยะภาพได้จาก $\dfrac{1}{2cm} + \dfrac{1}{q} = -\dfrac{1}{4cm}$

ได้ $q = -\dfrac{4}{3}cm$ เป็นภาเสมือนหัวตั้ง

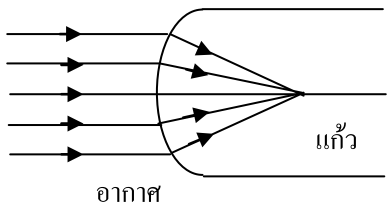
ขนาดกำลังขยาย $m = -\dfrac{q}{p} = +\dfrac{2}{3}$ ดังรูป



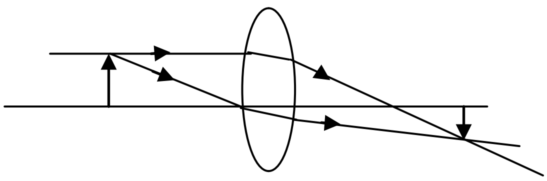

รูปที่ 16.20กระจกนูน

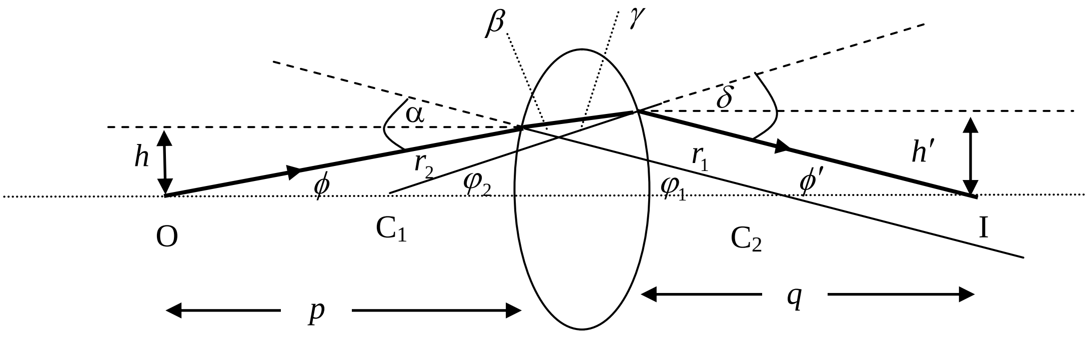
**16.4 เลนส์และการใช้ประโยชน์จากเลนส์**

ลำแสงขนานที่ตกกระทบตัวกลางโปร่งแสงผิวโค้งอาจเกิดการหักเหแสงแล้วเกิดการรวมกันเป็นจุดโฟกัสได้ ดังรูปที่สมมุติว่าแสงหักเหที่ปลายโค้งของแท่งแก้ว ดังนั้นการหักเหแสงในตัวกลางโปร่งแสงผิวโค้งจึงสามารถประยุกต์ใช้กับการเกิดภาพได้ จึงได้มีการประยุกต์ตัวกลางโปร่งแสงผิวโค้งมาเป็นเลนส์(lenses) ในรูปแบบต่างๆ ได้ โดยแบ่งเลนส์เป็นสองแบบใหญ่คือเลนส์นูน และเลนส์เว้า เลนนูนจะรวมแสงส่วนเลนส์เว้าจะกระจายแสง ในที่นี้จะเริ่มต้นจากการอธิบายเลนส์บางแลเลนส์นูนดังรูป




รูปที่ 16.21 การหักเหที่ผิวโค้ง






รูปที่ 16.22 การหักเหแสงผ่านเลนส์

จากรูป $\varphi_1 + \phi = \alpha$ และ $\varphi_2 + \phi' = \delta$ ในขณะที่ $\beta + \gamma = \varphi_1 + \varphi_2$ ถ้ามุมตกระทบเล็กมากๆ จะได้ไซน์ของมุมตกกระทบและของมุมหักเหต่างๆ ประมาณเท่ากับมุมนั้นๆ ดังนั้นตามกฎของสเนลล์จะได้

$$\alpha = n\beta \qquad \text{และ} \qquad n\gamma = \delta$$

เนื่องจากเป็นมุมเล็กๆ ดังนั้นจะประมาณเท่ากับแทนของมุมนั้นด้วย ดังนั้น

$$\phi = \frac{h}{p} \qquad \text{และ} \qquad \phi' = \frac{h'}{q}$$

ในขณะที่ $\varphi_1 = \dfrac{h}{r_1}$ และ $\varphi_2 = \dfrac{h'}{r_2}$

เมื่อหาค่า $\alpha+\delta$ จะได้ $\varphi_1+\varphi_2+\phi_1+\phi'=n\beta+n\gamma=n=n(\beta+\gamma)=n(\varphi_1+\varphi_2)$

หรือ $\phi+\phi'=(n-1)(\varphi_1+\varphi_2)$

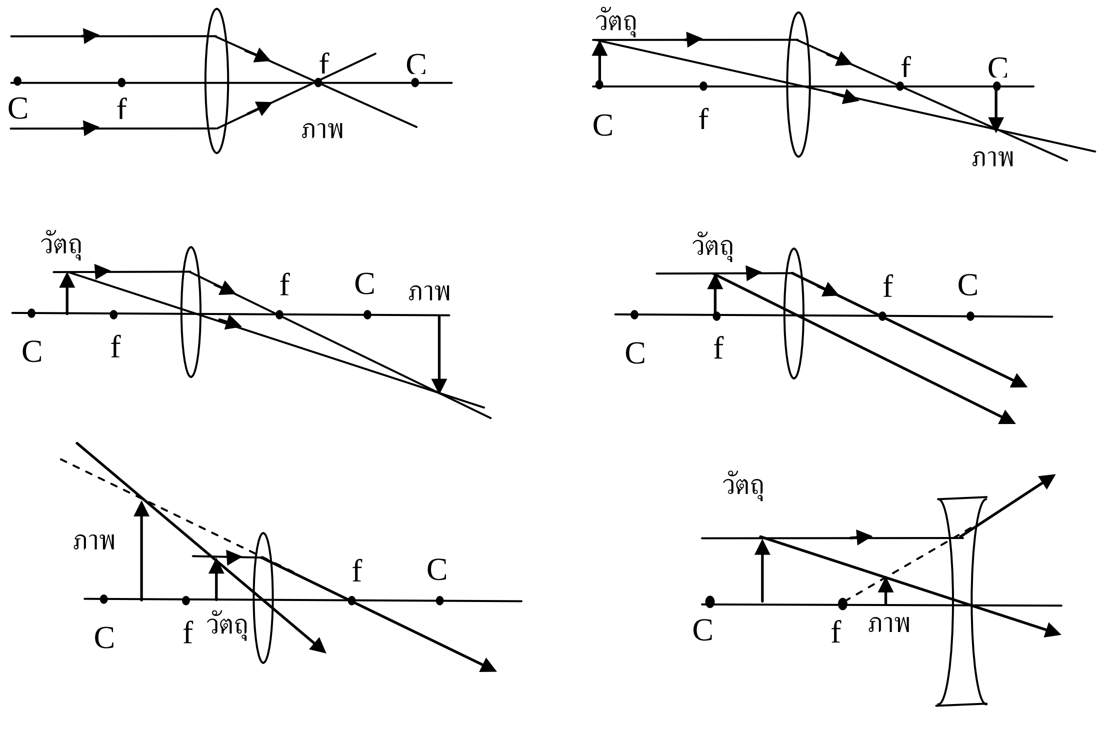
และ $\dfrac{h}{p}+\dfrac{h'}{q}=(n-1)\left(\dfrac{h}{r_1}+\dfrac{h'}{r_2}\right)$ ถ้า $h\cong h'$ จะได้ $\dfrac{1}{p}+\dfrac{1}{q}=(n-1)\left(\dfrac{1}{r_1}+\dfrac{1}{r_2}\right)$

นิยามส่วนกลับของโฟกัสของเลนส์บางคือ $\dfrac{1}{f}=(n-1)(\dfrac{1}{r_1}+\dfrac{1}{r_2})$ เป็นสมการของช่างทำเลนส์

ดังนั้นจะได้สมการสำหรับเลนส์บาง $\dfrac{1}{f}=\dfrac{1}{p}+\dfrac{1}{q}$

สมการนี้ใช้ได้กับทั้งเลนส์นูนและเลนส์เว้าถ้าใช้กับเลนส์นูนใช้เครื่องหมายของโฟกัสเป็นบวก ขณะที่ใช้กับเลนส์เว้าให้กำหนดโฟกัสเป็นลบ ส่วนกำลังขยายจะหาได้จาก $m=\dfrac{h'}{h}=-\dfrac{q}{p}$

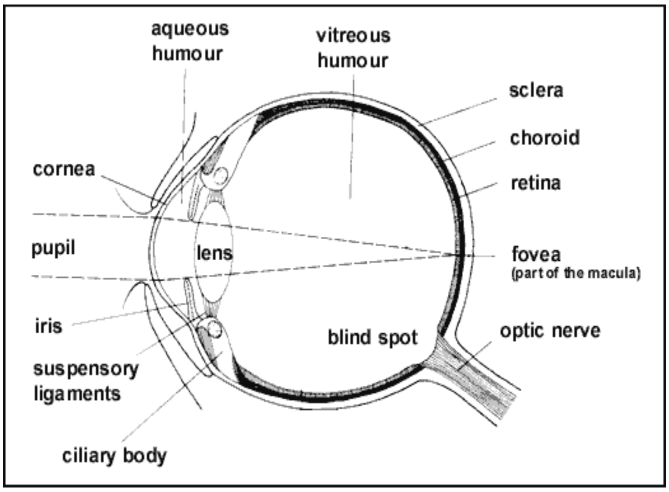
ในการเขียนภาพจากเลนส์ทั้งเลนส์นูนและเว้าที่เกิดจากวัตถุระยะต่างๆ มักกำหนดว่าเลนส์บางมาก แสงหักเหภายในเลนส์มีผลต่อเส้นรังสีน้อยมากจึงนิยมเขียนเส้นรังสีให้หักเหตรงแนวกลางเลนส์ และมีเส้นที่ต้องเขียนสองเส้นคือเส้นรังสีขนานจากหัววัตถุหักแล้วตัดแกนที่จุดโฟกัส เส้นที่สอง แสงจากหัววัตถุผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ไปตัดกับเส้นแรกเกิดเป็นหัวของภาพ ถ้าเส้นไม่ตัดกันแต่ทำมุมกันจะต้องต่อแนวแสงด้วยเส้นที่เหมือนตัดกันจริงอาจได้ภาพเสมือน ถ้าแสงทั้งสองหักเหผ่านเลนส์แล้วขนานกันจะเกิดภาพที่ระยะอนันต์ ดังตัวอย่างต่อไปนี้




รูปที่ 16.23 การเกิดภาพของเลนส์ที่ระยะวัตถุต่างๆกัน

**นัยน์ตา**

นัยน์ตามีรูปร่างเกือบกลมดังรูป มีส่วนประกอบสำคัญคือคอร์เนีย(cornea) เป็นเยื่อเหนียวใสนูนออกมาภายนอกสุด ถัดเข้าไปเป็นม่านตา(iris) ซึ่งมีช่องเปิดตรงกลางเรียกว่า “พิลพิว” (pupil) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 8 mm สามารถปรับให้เล็กลงเมื่อมองแสงจ้าเกินไป หรืออาจเปิดกว้างขึ้นเมื่อแสงน้อยเกินไป ทำหน้าที่ปรับแสงที่เข้าสู่ส่วนของเลนส์ใสที่เรียกว่า เลนส์คริสตาลไลน์(crystalline)ซึ่งเป็นเลนส์ที่มีองค์ประกอบซับซ้อน คือประกอบด้วยเนื้อเยื่อโปร่งแสงใสหลายชั้น มีค่าดัชนีหักเหแสงตั้งแต่ 1.37 ที่ชั้นนอกสุด จนถึง 1.42 ในชั้นตรงกลาง โดยมีกล้ามเนื้อซิลิอารี(ciliary)ยึดติดกันอยู่กับเลนส์และสามารถปรับรูปร่างเลนส์ให้หนาขึ้นหรือบางลงได้เพื่อเปลี่ยนทางยาวโฟกัสของเลนส์คริสตาลไลน์ให้ภาพชัดเจนทุกๆ ระยะของวัตถุ(เรียกว่ากระบวนการ accommodation)ผิวภายในลูกตาประกอบด้วยใยประสาท เรียกว่า เรตินา(ratina) ซึ่งต่อแยกย่อยมาจากประสาทตา เมื่อใยประสาทในเรตินาได้รับภาพจะส่งต่อสัญญาณผ่านประสาทตาไปยังสมอง ตรงจุดที่แนวสายตาตัดกับเรตินาตรงจุดที่เรียกว่า yellow spot ตรงกลางของจุดนี้เรียกว่า Fovea centralis ตรงบริเวณนี้มีความไวสูง การมองเห็นของตรงจุดนี้จะชัดเจนที่สุด ตรงทางประสาทตาเข้าสู่ตาที่ติดกับเรตินาจะไม่มีปลายประสาทตาอยู่เลยเรียกว่าจุดบอด ระหว่างเลนส์ตากับเรตินามีของเหลวใสที่เรียกว่า vitreorus humour ส่วนเนื้อเยื่อเรตินาตรงระบบประสาทอันซับซ้อนนี้จะประกอบด้วยชั้นของ rod และ cones ซึ่งทั้งสองไวต่อแสงมาก การมองเห็นเกิดจากแสงจากวัตถุผ่านเลนส์มาตก บนเรตินา ในคนสายตาปกติ (The “Normal Eye”) ระยะไกลสุดที่แสงจากวัตถุผ่านเลนส์ตามาเกิดภาพตกบนโฟกัสบนเรตินาพอดีจะเท่ากับระยะอนันต์(Far Point ; s = ∞)



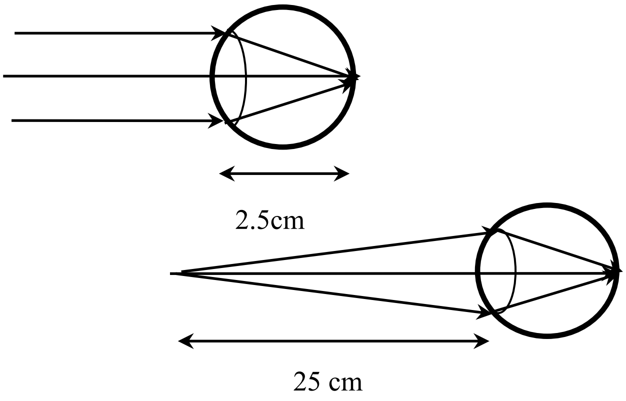

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = 0 + \frac{1}{2.5\,\text{cm}}$$

ซึ่งได้โฟกัสเท่ากับ $f = 2.5cm$

ส่วน Near Point; ระยะใกล้ที่สุดที่ภาพสามารถเกิดโฟกัสบนเรตินาได้ = 25 cm

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{25} + \frac{1}{2.5}$$

ซึ่งได้โฟกัสเท่ากับ $f = 2.3cm$



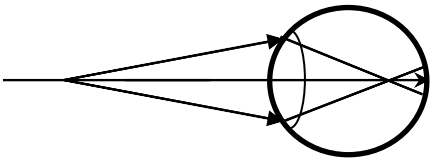

รูปที่ 16.24 นัยน์ตาและสายตา

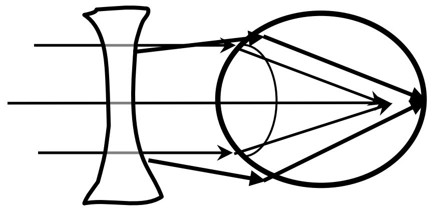
ดังนั้นสายตาคนปกติจะสามารถปรับโฟกัสของตาได้ระหว่าง 2.5 cm(the eye diameter) ถึง 2.3 cm และมองเห็นวัตถุได้ชัดเจนที่ระยะระหว่าง 25 cm ถึง $\infty$ เช่นนี้เรียกว่า “accommodation”

โดยทั่วไปจักษุแพทย์จะบอกขนาดของแว่นเป็นกำลังในหน่วยไดออปเตอร์(Diopter): $=\dfrac{1}{f(m)}$

**สายตาสั้น**

โครงสร้างกระบอกตาเปลี่ยนแปลงทำให้ภาพจากระไกลไปตกหน้าเรตินาจึงมองภาพระยะไกลไม่ชัดเจน การเพิ่มเลนส์เว้าลงไปด้านหน้าเลนส์ตาทำให้ภาพตกที่เรตินาพอดี

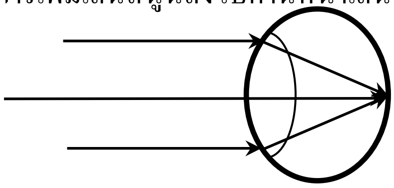


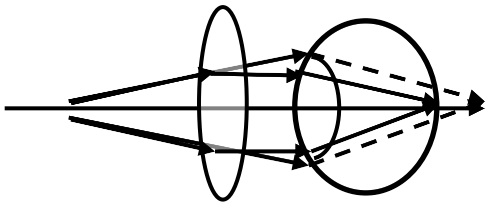


รูปที่ 16.25 สายตาสั้น

**สายตายาว**

โครงสร้างกระบอกตาเปลี่ยนแปลงทำให้ภาพจากระยะใกล้ไปตกหลังเรตินาจึงมองภาพระยะใกล้ไม่ชัดเจน การเพิ่มเลนส์นูนลงไปด้านหน้าเลนส์ตาทำให้ภาพตกที่เรตินาพอดี





รูปที่ 16.26 สายตายาว

Ex.จงหาโฟกัสและกำลังที่พอดีกับ ก.)คนสายตายาวที่ระยะใกล้ตา 125 cm ข)คนสายตาสั้นที่ระยะไกลตา 50 cm

วิธีทำ ก.) คนสายตายาวที่มองเห็นได้ใกล้สุด 125 cm ต้องการมองเห็นวัตถุที่ระยะ 25 cm ชัดเจน จะต้องมีทางยาวโฟกัสเท่ากับ

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

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{25}+\frac{1}{-125}=\frac{5-1}{125cm}$$

$$\frac{1}{f}=\frac{4}{125\times10^{-2}m}=\frac{4\times10^{2}}{125m}=3.2D$$

ข.) คนสายตาสั้นที่มองเห็นได้ไกลสุด 50 cm ต้องการมองเห็นวัตถุที่ระยะอนันต์แล้วเกิดภาพเสมือนที่ 50 cm พอดีจะต้องมีทางยาวโฟกัสเท่ากับ

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

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{\infty}+\frac{1}{-50}=-\frac{1}{50cm}$$

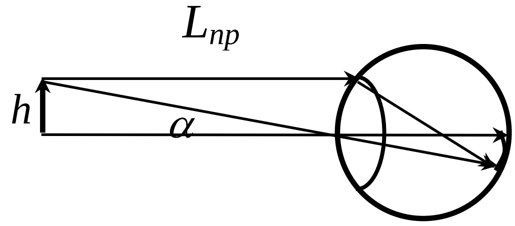
$$\frac{1}{f}=-\frac{1}{50\times10^{-2}m}=-\frac{1\times10^{2}}{50m}=-2D$$

**เลนส์ประกอบ(Special Lens Combinations)**

ถ้าใช้เลนส์บางสองอันวางชิดกันอาจได้ผลลัพธ์แบบเลนส์เดี่ยวๆ ที่มีความยาวโฟกัสของเลนส์ประกบ (doublet) เท่ากับ $\dfrac{1}{f_{doublet}} = \dfrac{1}{f_1} + \dfrac{1}{f_2}$

จากกำลังของเลนส์ $P = \dfrac{1}{f}$

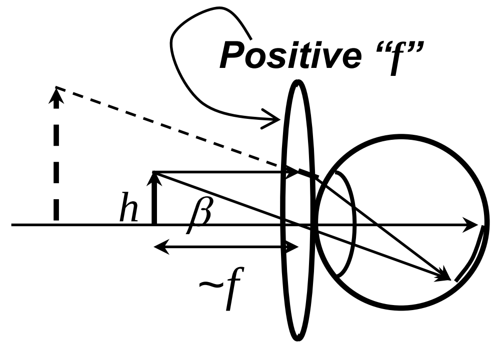
กำลังของเลนส์ประกบเท่ากับ $P_{doublet} = P_1 + P_2$




ระยะใกล้สุดทีสายตามองเห็นได้ชัดเจน

**Apparent Magnification**

สายตารับรู้ขนาดของวัตถุจากขนาดของภาพบนเรตินา จากสายตาปกติมองเห็นวัตถุชัดเจนใกล้สุดที่ 25 cm (*Lnp*) ดังนั้นมุมมากสุดที่จะเห็นภาพโตสุดชัดเจนสุดที่ 25 cm นี้จะเท่ากับ $\alpha \approx \dfrac{h}{L_{np}}$ จากมุมของภาพจากการวางวัตถุที่โฟกัสหน้าเลนส์ดังรูปคือ $\beta \equiv \dfrac{h}{f}$ โดยปกตินิยมหา apparent magnification factor ของเลนส์จากอัตราส่วนของ angular size โดยเลนส์ต่อ **angular size** ขณะที่ไม่มีเลนส์




ภาพที่เห็นจากการมองผ่านเลนส์ชัดเจนเมื่อวัตถุห่างเลนส์ประมาณใกล้กว่าโฟกัส

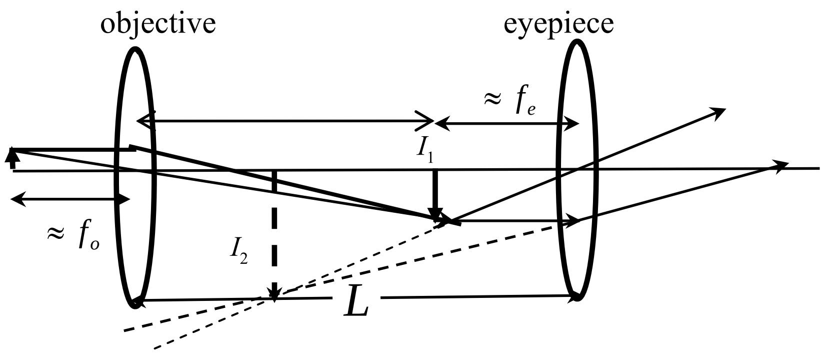
รูปที่ 16.27 ระยะสายตาและเลนส์

Define Angular Magnification

$$M \equiv \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{L_{np}}{f} = \frac{0.25}{f}$$

**Microscope**

การขยายภาพให้โตขึ้นนอกจากจะใช้เลนส์อันเดียวเป็นแว่นขยายแล้วยังอาจใช้นำเลนส์สองอันมาประกอบกันเพื่อให้ได้ภาพที่มีกำลังขยายมากขึ้นด้วย เรียกว่ากล้องจุลทรรศน์ หลักการของกล้องจุลทรรศน์คือ วางวัตถุไว้ใกล้โฟกัสเลนส์ทางยาวโฟกัสสั้นมากๆ (objective lens) เพื่อให้ได้ภาพจริงหัวกลับอีกด้านหนึ่งของเลนส์ แล้วใช้เลนส์ที่มีทางยาวโฟกัสยาวๆ (eyepiece)เป็นแว่นขยายภาพต่ออีกช่วงหนึ่งดังรูป




รูปที่ 16.28 กล้องจุลทรรศน์

กำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุเท่ากับ $M_0 = -\dfrac{s'}{s} = -\dfrac{L - f_e}{f_o}$

กำลังขยายของเลนส์เท่ากับ $M_e \approx \dfrac{L_{np}}{f_e}$

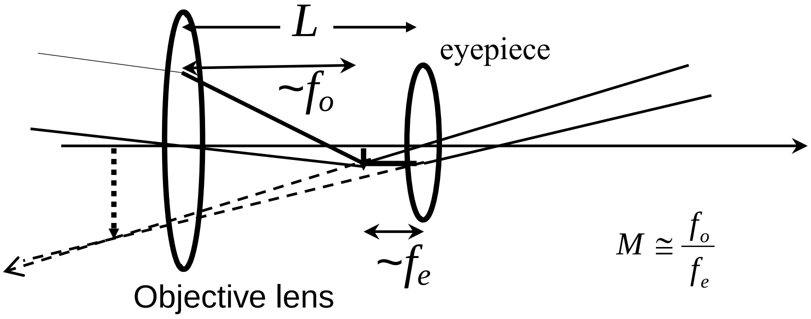
กำลังขยายรวมเท่ากับ $M = M_o \times M_e = -\dfrac{L - f_e}{f_0}\dfrac{L_{np}}{f_e}$

**Telescopes**

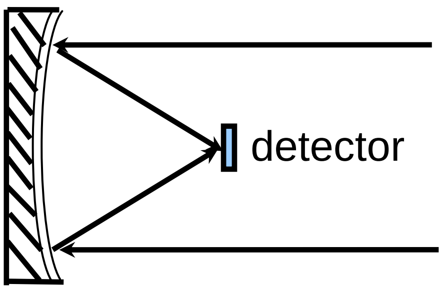
จุดประสงค์ของ telescope คือรวบรวมแสงจากวัตถุที่อยู่ระยะไกลขยายให้เห็นอยู่ใกล้ๆได้

Refracting telescopes:ใช้เลนส์ที่มีทางยาวโฟกัสมากเป็นเลนส์ใกล้วัตถุ รวมแสงจากวัตถุระยะไกลมาตกลงหลังโฟกัสของเลนส์ จากนั้นใช้เลนส์นูนหรือเลนส์เว้าเป็นเลนส์ใกล้ตาวางใกล้โฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ เพื่อขยายภาพให้โตขึ้น

Reflecting telescopes:ใช้กระจกโค้งเว้าสร้างภาพของวัตถุระยะไกล เป็นที่นิยมในวงการดาราศาสตร์ทั่วไป หลักการคือใช้กระจกโค้งเว้ารัศมีมากๆ รับแสงจากวัตถุระยะไกลให้มาตกลงที่ใกล้จุดโฟกัส แล้วใช้กระจกเล็กๆ สะท้อนภาพออกมาให้มองเห็นได้ชัดเจน หรือใช้ตัวรับภาพแทนกระจกเล็กๆ ดังรูป หลักการนี้จะได้กำลังขยายสูงกว่าแบบแรก




รูปที่ 16.29 กล้องโทรทัศน์แบบหักเห(รูปบน)และแบบสะท้อน(รูปล่าง)

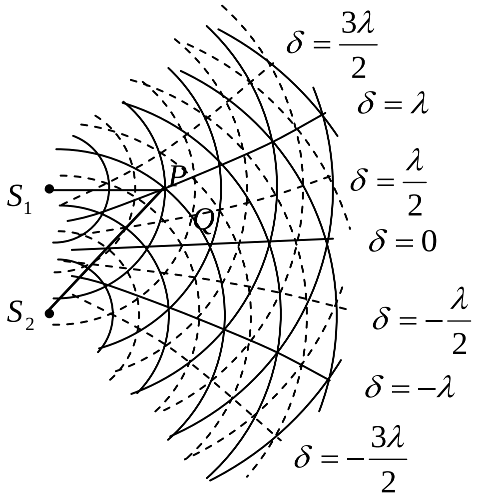


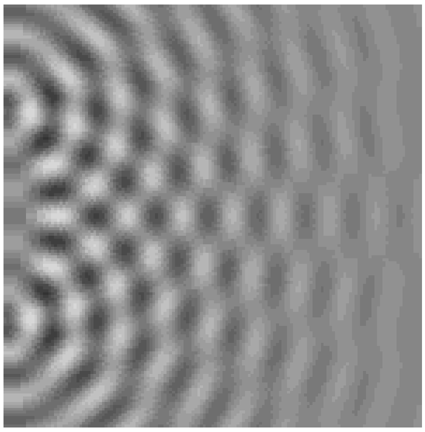

**16.5 การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสง**

**การแทรกสอดของแสง(Interference)**

ปรากฏการณ์ของแสงในระดับของแสงเชิงกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งคือการแทรกสอดของแสง การแทรกสอดเป็นสมบัติอย่างหนึ่งของคลื่น ซึ่งเกิดจากคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่มาพบกัน ถ้ายอดคลื่นพบกับท้องคลื่นของอีกกระบวนหนึ่งจะหักล้างกันส่วนบริเวณที่ยอดคลื่นกับยอดคลื่นพบ

กันจะเกิดเสริมกันดังได้กล่าวไว้แล้วในเรื่องคลื่น ถ้าคลื่นจากแหล่งกำเนิด $S_1$ และ $S_2$ ดังรูป จะพบการหักล้างและเสริมกันสลับกันในตำแหน่งชิดกัน ในรูปนี้เป็นตัวอย่างการแทรกสอดของคลื่นน้ำ



ภาพจาก www.colorado.edu/physics/2000/

รูปที่ 16.30 การแทรกสอด

ถ้ากำหนดให้ระยะจาก $S_1$ และจาก $S_2$ ไปยังจุดพบกันใดๆ เป็น $r_1$ และ $r_2$ ตามลำดับ ส่วนผลต่างระยะทั้งสองเป็น $\delta = r_2 - r_1$ เมื่อพิจารณาจุดที่คลื่นพบกันที่จุด $P$ ซึ่งได้ระยะแตกต่างกันคือ $\delta = S_2P - S_1P = \lambda$ ดังนั้นที่จุดอื่นที่คลื่นเกิดการเสริมกันจะเป็น

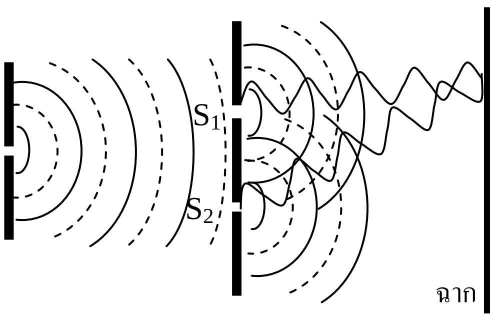
$$\delta = m\lambda \qquad \text{เมื่อ } m = 0, \quad +1, \quad +2, \ldots$$

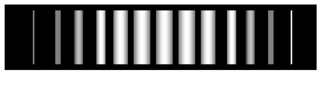
ในขณะที่การหักล้างกันที่จุดต่างๆจะได้

$$\delta = (m + \frac{1}{2})\lambda \qquad \text{เมื่อ } m = 0, \quad +1, \quad +2, \ldots$$

**การทดลองของยัง(Young's Experiment)**

ในปี 1802 Thomas Young ได้ทำการทดลองใช้แสงผ่านช่องเปิดสองช่องเล็กๆ ประมาณเท่ารูเข็ม ให้แสงผ่านเข้ามาในห้องมืดแล้วเกิดการแทรกสอดกันเห็นเป็นที่ห่างออกไปจากช่องเปิดเป็นระยะไกลๆ ดังรูป



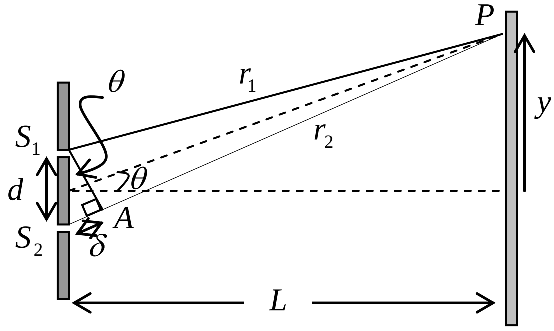
ภาพแถบมืดสว่างบนฉาก

รูปที่ 16.31 การทดลองของยัง

เพื่อที่จะหาสมการสำหรับอธิบายการเกิดแถบมืดสว่าง(fringes) จะสมมุติว่าแสงมีความยาวคลื่นเดียว $\lambda$ และระยะห่างของช่องเปิดน้อยมากเท่ากับ $d$ และสมมุติจุดที่คลื่นจากช่องเปิดทั้งสอง

พบกันที่จุด $P$ ใดๆ บนฉาก จะเป็นบริเวณแถบมืดหรือสว่างก็ได้ ขึ้นกับผลต่างของระยะ $r_2$ และ $r_1$ เรียกว่า Path difference

โดยที่ $r_2$ และ $r_1$ เป็นระยะห่างระหว่าง $S_2$ และ $S_1$ กับจุด ตามลำดับ



รูปที่ 16.32 สมการแทรกสอด

ดังนั้น Path difference เท่ากับ $\delta = S_2A$

หรือเท่ากับ $\delta = r_2 - r_1 \cong d\sin\theta$

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

โดยที่ $m = 0, \quad \pm 1, \quad \pm 2, ....$

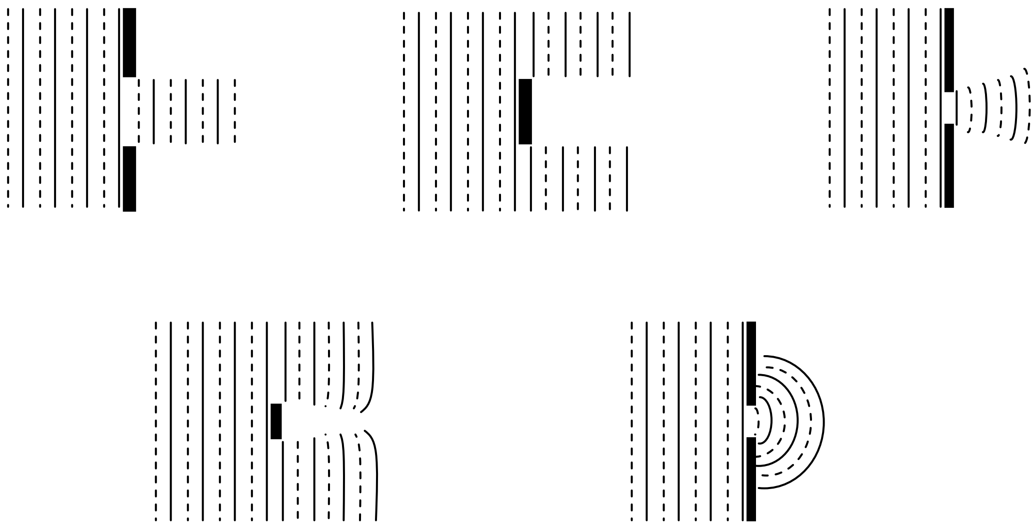
กรณีที่เกิดการหักล้างกัน $d\sin\theta = (m + \frac{1}{2})\lambda$

โดยที่ $m = 0, \quad \pm 1, \quad \pm 2, ....$

ความเข้มของแถบมืดสว่าง(Intensity of fringes) คำนวณหาได้จากสมการ $I = 4I_0\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$

**การเลี้ยวเบนของแสง(Diffraction)**

ปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งที่สำคัญในเรื่องคลื่นคือ การเลี้ยวเบนของคลื่นซึ่งอธิบายปรากฏการณ์ได้ด้วยหลักของฮอยเกนส์ คือเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดเล็กๆ หรือแผ่นกั้นซึ่งขนาดโตกว่าความยาวคลื่นเล็กน้อยจะเกิดการเลี้ยวเบนของคลื่นเพราะเมื่อหน้าคลื่นใหม่ดังรูป

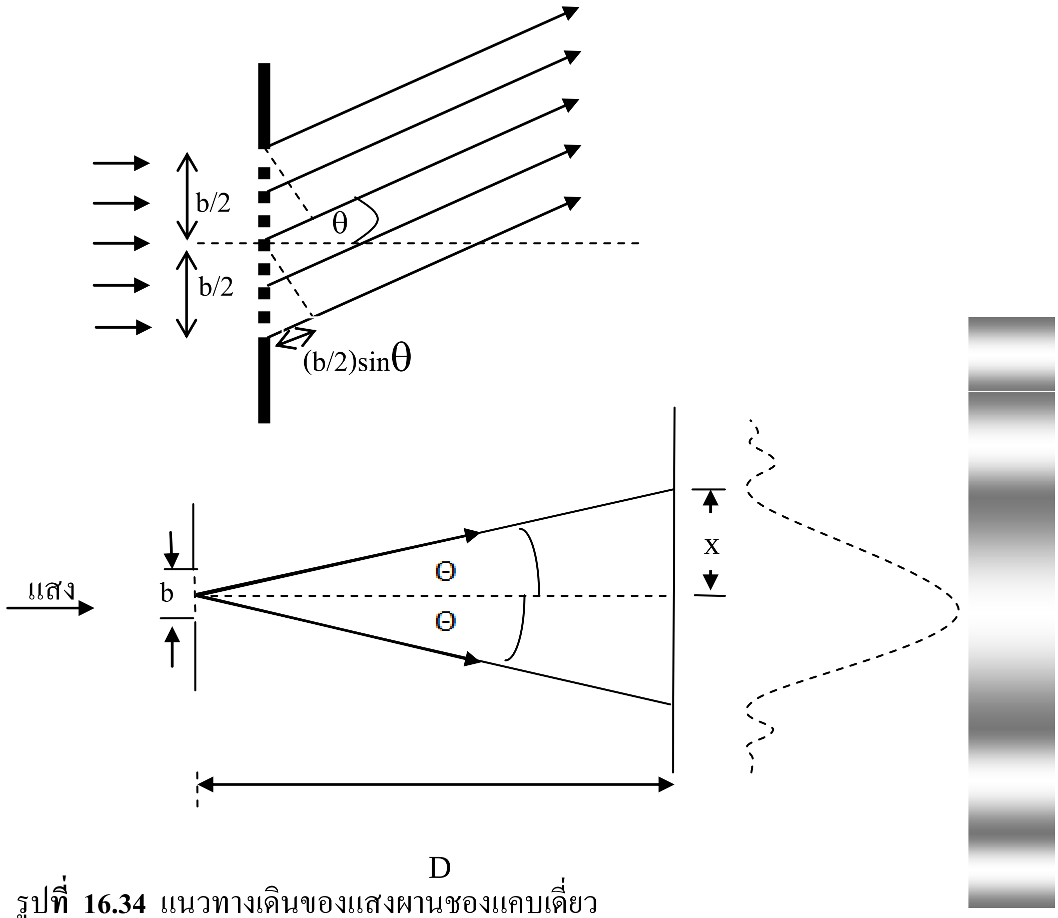


รูปที่ 16.33 การเลี้ยวเบน

แสงก็เป็นคลื่นดังนั้นเมื่อเมื่อแสงผ่านช่องเปิดที่เรียกว่า “สลิต” จะเกิดการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นพร้อมกับมีการแทรกสอดกันเกิดขึ้นด้วย

**การเลี้ยวเบนจากช่องแคบเดี่ยว**

ถ้าฉายแสงเลเซอร์ความยาวคลื่น $\lambda$ ผ่านช่องแคบเดี่ยวที่มีขนาดความกว้าง b ดังภาพที่ 16.34 แสงที่ผ่านช่องแคบจะเลี้ยวเบนได้ ถ้าช่องแคบเดี่ยวมีความสูงมากกว่าความกว้างมากๆ แสงที่เลี้ยวเบนจะอยู่ในแนวตั้งฉากกับแนวยาวของช่องแคบ จะทำให้เกิดภาพเป็นแถบมืดและแถบสว่างสลับกัน โดยแถบสว่างตรงกลางจะกว้างและสว่างมากที่สุด ส่วนแถบสว่างอันดับต่อๆไปจะแคบกว่า และความสว่างจะน้อยลงภาพที่ได้ เรียกว่า ริ้วของการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) จำนวนแถบสว่างที่จะเห็นได้ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงที่มาตกบนช่องแคบและขึ้นกับขนาดของช่องแคบด้วย ดังแสดงในรูปที่ 16.35




รูป**ที่ 16.34** แนวทางเดินของแสงผานชองแคบเดี่ยว

มุม $\theta$ ซึ่งสอดคล้องกับสมการ

$$(n+ \tfrac{1}{2})\lambda = (b/2)\sin\theta_n$$

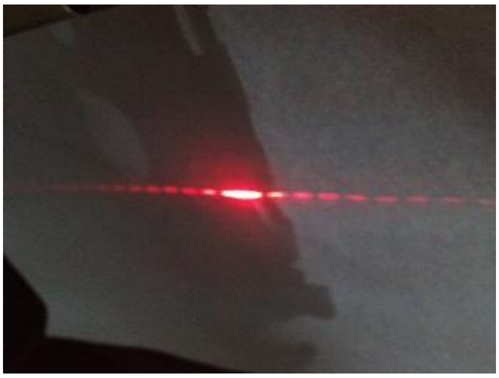
เมื่อ n คือ อันดับของแถบมืด ±1, ±2, ±3,…

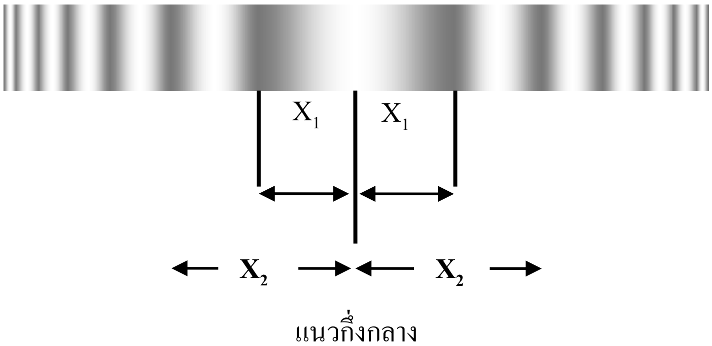
โดยทั่วไป $\theta$ มีค่าน้อย $\quad \sin\theta \cong \tan\theta$

จะได้ $\quad n\lambda = b\tan\theta$

โดยที่ D = ระยะจากช่องแคบเดี่ยวถึงฉาก b = ความกว้างของช่องแคบเดี่ยว

X = ระยะจากกลางแถบมืดแรกถึงกลางแถบสว่างกึ่งกลาง



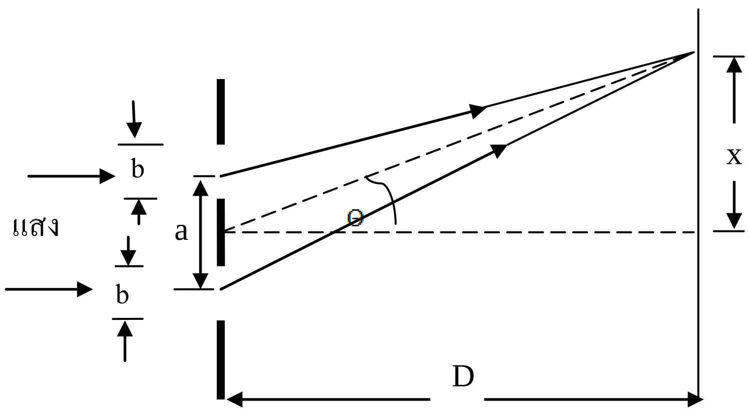



รูป**ที่ 16.35** ริ้วของการเลี้ยวเบนจากช่องแคบเดี่ยว

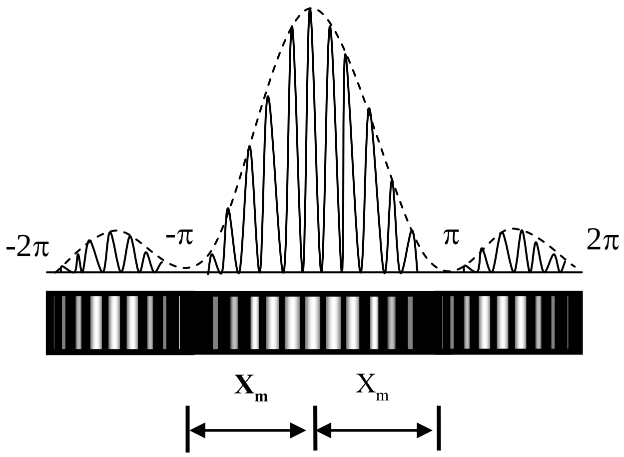
การเลี้ยวเบนจากช่องแคบเดี่ยว ตำแหน่งของแถบมืดของริ้วของการเลี้ยวเบนจะอยู่ในแนว

**การเลี้ยวเบนจากช่องแคบคู่**

เมื่อจัดให้แสงเลเซอร์ตกลงบนช่องแคบคู่ที่มีขนาดความกว้างของช่องแคบเป็น b และถ้าระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของช่องแคบทั้งสองเป็น a ดังรูปที่ 16.36 แสงที่ผ่านแต่ละช่องของช่องแคบคู่จะเกิดการเลี้ยวเบนก่อนหลังจากนั้นจะไปแทรกสอดบนฉากเกิดแถบมืดแถบสว่างของการแทรกสอดให้เห็นในแถบสว่างของการเลี้ยวเบนได้ดังรูปที่ 16.37




รูป**ที่ 16.36** แนวทางเดินของแสงผ่านช่องแคบคู่




รูป**ที่ 16.37** ริ้วการแทรกสอดเมื่อแสงผ่านช่องแคบคู่

ริ้วของการเลี้ยวเบนจะมีแถบสว่างตรงกลางกว้างที่สุด ความกว้างของแถบสว่างอันดับต่อไปจะลดลง ดังภาพที่ 6 ส่วนริ้วของการแทรกสอด (interference pattern) แถบสว่างและแถบมืดแต่ละแถบมีระยะห่างเท่ากันหมด ซึ่งตำแหน่งของแถบมืด อาจบอกเทอมของระยะทางบนฉาก ($X_n$) ดังนี้

$$X_n = \frac{n\lambda D}{b}$$

เมื่อพิจารณาถึงการแทรกสอดโดยแสงจากช่องแคบคู่ ตำแหน่งของแถบมืดของริ้วการแทรกสอดหาได้จากสมการ

$$\frac{2m+1}{2}\lambda = a\,sin\theta_m$$

เมื่อ $\theta_m$ เป็นมุมที่บอกตำแหน่งของแถบมืด

m เป็นอันดับของแถบมืด

มุม $\theta$ เป็นมุมเล็กๆ จะได้

$$\frac{2m+1}{2}\lambda = a\,tan\,\theta_m$$

$$X_m = \frac{2m+1}{2}\lambda \cdot \frac{\lambda D}{a}$$

เมื่อ $X_m$ เป็นระยะของตำแหน่งกลางแถบมืดที่วัดถึงจุดกลางของแถบสว่างแถบกลาง ตำแหน่งของแถบสว่างของชุดริ้วของการแทรกสอดจะหาได้จากสมการ

$$m\lambda = a \sin \theta_m$$

และ $$X_m = \frac{m\lambda D}{a}$$

**การเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง**

เกรตติงเป็นแผ่นใสมีเส้นตรงทึบแสงขนานกันอย่างสม่ำเสมอจำนวนมาก แผ่นเกรตติงจึงเป็นแผ่นที่มีช่องแคบจำนวนมากนั่นเอง แสงความยาวคลื่น $\lambda$ เมื่อผ่านเกรตติงจะมีการเลี้ยวเบนและแทรกสอด ทำนองเดียวกับเมื่อผ่านช่องแคบคู่โดยปกติขนาดความกว้างของช่องแคบ (b) ของแผ่นเกรตติงจะมีค่าน้อยและน้อยกว่าระยะระหว่างช่องแคบ (a) มาก ผลจากการแทรกสอดของแสง

จึงปรากฏชัดเจน ดังนั้นถ้าเริ่มสังเกตริ้วที่ได้ โดยใช้ช่องแคบที่มีขนาดของช่องค่อยๆเล็กลงและมีจำนวนช่องค่อยๆเพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าแถบสว่างกลางของริ้วการเลี้ยวเบนจะค่อยๆกว้างขึ้น และจะมีแถบสว่างที่เนื่องจากการแทรกสอดคมชัดมากและอยู่ห่างกันเท่าๆกัน ยิ่งจำนวนช่องแคบใน 1 หน่วยความยาวของเกรตติงมากขึ้น แถบสว่างกลางของริ้วของการเลี้ยวเบนยิ่งกว้างออก และแถบมืด แถบสว่างของการแทรกสอดที่ปรากฏในแถบสว่างกลางของริ้วการเลี้ยวเบน ก็ยิ่งแยกห่างจากกันมากขึ้น ผลที่ได้เป็นดังรูปที่ 16.38 ตำแหน่งของแถบสว่างเหล่านี้จะหาได้จากสมการ

$$n\lambda = d \sin \theta_n$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างช่องแคบ 2 ช่องที่ติดกัน

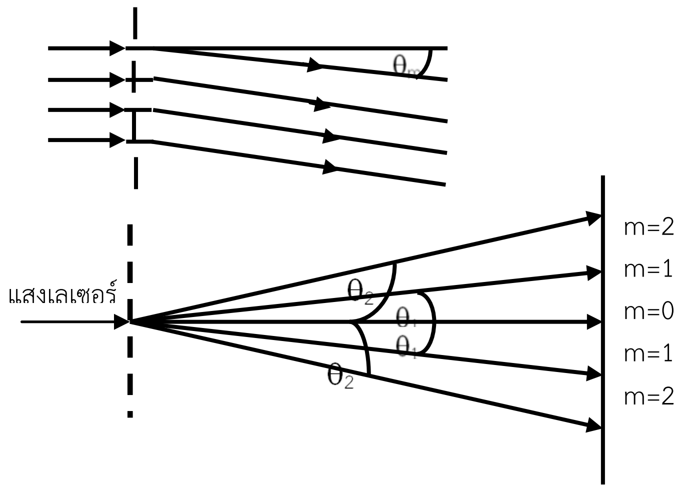
n คือ อันดับของแถบสว่างที่ได้บนฉาก

n = 0 คือ แถบสว่างที่อยู่กลางฉากอยู่ในแนวของแสงตก เรียนกว่า แถบสว่างอันดับที่ศูนย์

n = ±1, ±2, ±3… คือ แถบสว่างอันดับที่ 1, 2, 3… ทางด้านขวาและด้านซ้ายของแถบ สว่างอันดับที่ศูนย์ ตามลำดับ

เกรตติงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถสร้างขึ้นด้วยความละเอียดสูงมาก จำนวนช่องของเกรตติงอาจมีตั้งแต่ 1000 - 10000 ช่องใน 1 เซนติเมตร โดยมีความห่างของช่องเท่ากัน ค่ามุมที่รับภาพก็อาจวัดได้อย่างแม่นยำ ทำให้วิธีการวัดค่าความยาวคลื่นเป็นไปอย่างสะดวกและมีความแม่นยำสูง ค่าความยาวคลื่นหาได้ดังนี้

$$\lambda = \frac{d\sin \theta_n}{n} \qquad (9)$$




**รูปที่ 16.38** การเลี้ยวเบนเนื่องจากเกรตติง

เกรตติงส่วนใหญ่จะให้มุม $\theta_1$ มากกว่า 10 องศา ซึ่งไม่ถือว่าเป็นมุมเล็กๆ ค่า sin $\theta$ จึงไม่เท่ากับ tan $\theta$ ดังนั้นจะต้องมีความระมัดระวังในการคำนวณเป็นพิเศษ

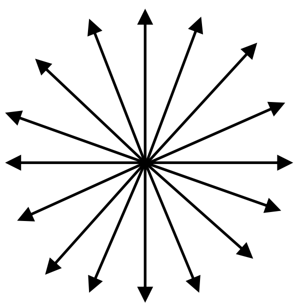
เกรตติงเลี้ยวเบน เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความยาวคลื่นในสเปกตรัมของแสง

ตารางที่ 1 แสดงความยาวคลื่นของแสงสีต่าง ๆ

| แสงสี | ความยาวคลื่น (นาโนเมตร nm) |
|---|---|
| ม่วง | 380-450 |
| น้ำเงิน | 450-500 |
| เขียว | 500-570 |
| เหลือง | 570-590 |
| แสด | 590-610 |
| แดง | 610-760 |

**โพลาไรเซชัน(Polarization)**

โพลาไรเซชันเป็นสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งของคลื่นเช่นเดียวกับการแทรกสอดและการเลี้ยวเบน แสงจากแหล่งกำเนิดโดยทั่วไปรวมทั้งแสงอาทิตย์ไม่เป็นแสงโพลาไรซ์(unpolarized) ซึ่งมีเวกเตอร์สนามไฟฟ้าตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแสงและกระจายออกไปเป็นมุมต่างๆได้โดยรอบ 360° ดังรูปที่ 16.39a ส่วนกรณีเฉพาะบางกรณีที่แสงอาจถูกจัดให้สนามไฟฟ้าพุ่งผ่านไปได้ในแนวเดียวดังรูปที่ 16.39 b กรณีดังกล่านี้เช่นแสงที่ผ่านออกมาจากแผ่นโพลารอยด์ แสงเลเซอร์แบบโพลาไรซ์ แสงสะท้อนจากผิวตัวกลางบางชนิดที่มุมหนึ่งที่ให้แสงโพลาไรซ์



(a)

(b)

รูปที่ 16.39 a) เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของแสงไม่โพลาไรซ์ b) เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าของแสงโพลาไรซ์

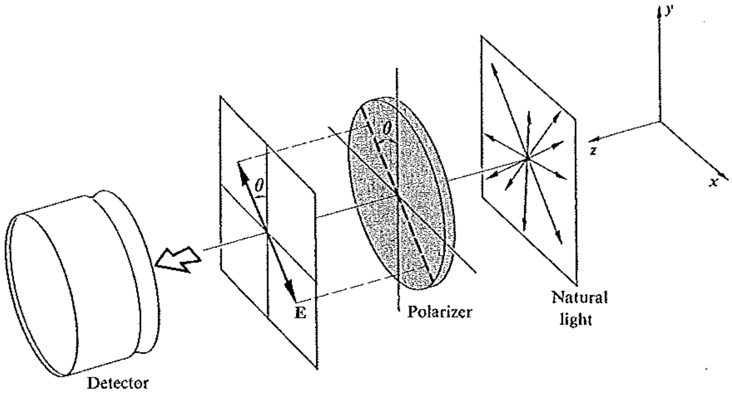



**Figure 8.10** A linear polarizer.

***Malus's Law***

สายตาเปล่าไม่สามารถแยกแสงโพลาไรซ์ได้จึงมักต้องมีอุปกรณ์ช่วยสังเกต อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ให้แสงไม่เป็นโพลาไรซ์ผ่านเข้าไปแล้วได้แสงโพลาไรซ์ออกมาจะเรียกว่าตัวทำโพลาไรเซอร์ (**polarizer**) การจะตรวจสอบว่าอุปกรณ์ใดเป็นตัวทำโพลาไรซ์เชิงเส้นหรือไม่ วิธีง่ายๆ คือถ้าแสงไม่เป็นโพลาไรซ์ตกกระทบตัวทำโพลาไรซ์เชิงเส้นแล้วจะได้รับแสงโพลาไรซ์เชิงเส้น P-state ออกมา การบิดมุมโพลาไรซ์ของ P-state จะตรวจสอบเทียบจากแกนส่งผ่านของตัวทำโพลาไรซ์ (**transmission axis** of the polarizer)

ถ้านำตัวทำโพลาไรซ์ตัวที่สองแทนเข้าไปในเส้นทางเดินของแสง และเรียกตัวทำโพลาไรซ์ที่สองนี้ว่าตัววิเคราะห์โพลาไรซ์(**analyzer**) ถ้าวางตัววิเคราะห์โพลาไรซ์ทำมุม $\theta$ เทียบกับตัวทำโพลาไรซ์และได้แอมปลิจูดของสนามไฟฟ้าที่ผ่านออกมาจากตัววิเคราะห์เท่ากับ $E_0 \cos\theta$ จะพบว่าความเข้มส่องสว่างหลังตัววิเคราะห์เท่ากับ

$$I(\theta) = \frac{c\varepsilon_0}{2} E_0^2 \cos^2 \theta .$$

เมื่อ $\theta = 0$ ความเข้มส่องสว่างจะผ่านออกมาได้สูงสุด ดังนั้นสมการอาจเขียนได้เป็น

$$I(\theta) = I(0)\cos^2 \theta ,$$

เมื่อ $I(0) = \frac{c\varepsilon_0}{2} E_0^2$ สมการข้างต้นนี้เป็นที่รู้จักในชื่อของ **Malus's law**

**การบ้าน**

1. กระจกเว้ารัศมี 10 cm จงคำนวณหาตำแหน่งและขนาดของภาพ พร้อมแสดงแผนภาพให้ได้สัดส่วนเมื่อวางวัตถุ สูง 2cm ไว้ที่ตำแหน่งต่างดังนี้

ก.) 10 cm ข.) 7.5 cm ค.) 5cm ง.) 2.5

2. กระจกนูนรัศมี 10 cm จงคำนวณหาตำแหน่งและขนาดของภาพ พร้อมแสดงแผนภาพให้ได้สัดส่วนเมื่อวางวัตถุไว้ที่ตำแหน่งต่างดังนี้

ก.) 10 cm ข.) 2.5 cm

3. เลนส์นูนรัศมี 10 cm จงคำนวณหาตำแหน่งและขนาดของภาพ พร้อมแสดงแผนภาพให้ได้สัดส่วนเมื่อวางวัตถุไว้ที่ตำแหน่งต่างดังนี้

ก.) 10 cm ข.) 7.5 cm ค.) 5cm ง.) 2.5

4. จงหากำลังของแว่นขยายสำหรับ

ก.) คนสายตายาวที่มีระยะใกล้ตา 100 cm ข.)คนสายตาสั้นที่ระยะไกลตา 75 cm