

## ทัศนศาสตร์เรขาคณิต

หญิงขายเหล้า ผู้มีสีหน้าละห้อยในภาพ "บาร์เหล้า ที่โพลี-แบร์แซร์" เป็นโปสเตอร์สุดท้ายที่มานิโด้วาดไว้ ภาพถูกเขียนขึ้นในปี ค.ศ. 1882 เป็นรูปของหญิงสาวทำหน้าที่เป็นบาร์เทนเดอร์ กำลังยืนอยู่หน้าบาร์เหล้า ข้างหลังเป็นกระจกบานใหญ่ ทำหน้าคร่ำมองชายมีหนวดคนหนึ่ง แต่ภาพนี้ถ้าคุณสังเกตให้ดีเป็นภาพที่ไม่จริง ผิดหลักการทางฟิสิกส์ คุณลองหาที่ผิดดู **คลิกที่นี่ครับ** ☀️ คุณจะได้ทราบชีวิตอันน่าสงสารของมานิโด้วาดภาพด้วย



### 10-1 ธรรมชาติของแสง

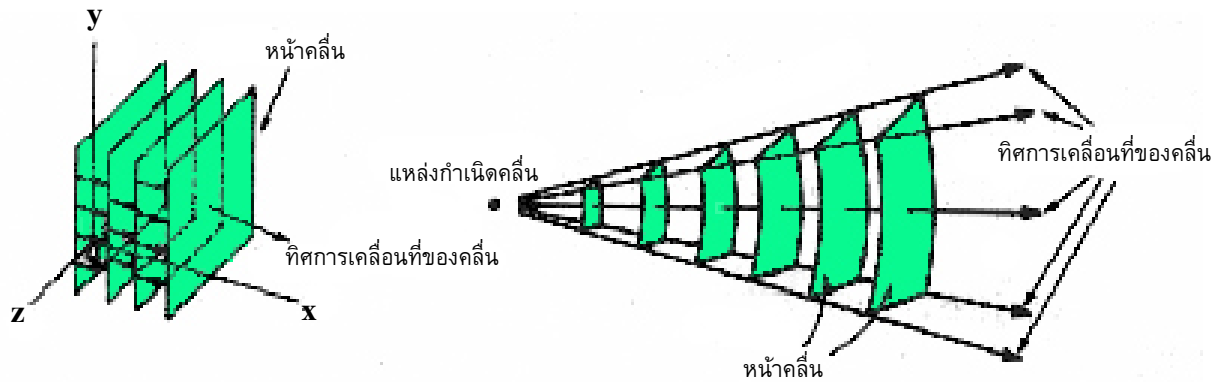
แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประเภทหนึ่ง สามารถเคลื่อนที่ผ่านสุญญากาศได้ด้วยความเร็วเท่ากับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอื่น คือ  $3 \times 10^8$  m/s และมีสมบัติเหมือนกับคลื่นตามขวางทั่ว ๆ ไป คือมีการสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) การเลี้ยวเบน (diffraction) การแทรกสอด (interference) และโพลาไรเซชัน (polarization)

ในความคิดของนักวิทยาศาสตร์ปัจจุบัน เชื่อว่าแสงมีสมบัติเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค แสงประพัตต์ตัวเป็นคลื่นพบได้ในปรากฏการณ์การแทรกสอดของยัง (Young) ทฤษฎีหน้าคลื่นของฮอยเกนส์ (Huygens) ใช้อธิบายการสะท้อนและการหักเห สมบัติความเป็นคลื่นของแสงใช้อธิบายการทดลองการเลี้ยวเบนของเฟรสเนล (Fresnel) แต่สมบัติความเป็นคลื่นไม่สามารถนำไปใช้อธิบายการเกิดอิเล็กตรอนอิสระบนผิวโลหะเมื่อแสงตกกระทบ ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์คอมป์ตัน และไม่สามารถอธิบายการแผ่รังสีของวัตถุดำได้ครบสมบูรณ์ ปรากฏการณ์เหล่านี้ต้องใช้สมบัติความเป็นอนุภาคของแสงอธิบายโดยตั้งสมมติฐานว่าแสงเป็นอนุภาคไร้มวล เรียกว่า โฟตอน (photon) พลังงานของโฟตอน 1 ตัวมีค่าเท่ากับ  $hf$  เมื่อ  $h$  คือค่าคงที่ของพลังค์ (planck's constant) มีค่าเท่ากับ  $6.63 \times 10^{-34}$  J·s และ  $f$  เป็นความถี่ของแสง สมมติฐานที่ให้แสงเป็นอนุภาคสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่กล่าวมา

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

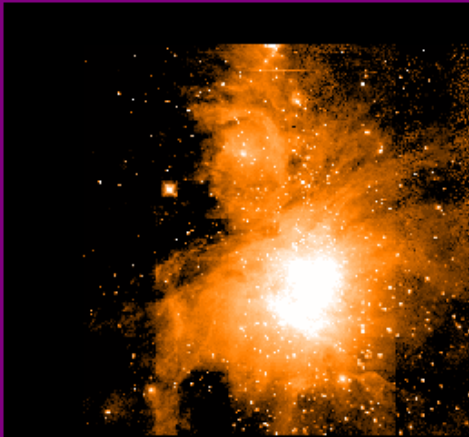
การหาหน้าคลื่นใหม่ของแสงสามารถทำได้โดยวิธีทางเรขาคณิต เรียกว่า หลักของฮอยเกนส์ (Huygens' principle) กล่าวว่าทุก ๆ จุดบนหน้าคลื่นถือว่าเป็นต้นกำเนิดคลื่นทุติยภูมิ (secondary wave) ที่แผ่ออกไปด้วยความเร็วเท่าเดิมในทิศทางเดิม เส้นสัมผัสที่ลากผ่านตำแหน่งเหล่านี้เป็นหน้าคลื่นใหม่





รูป10-1 (ก) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นระนาบ (ข) การสร้างหน้าคลื่นใหม่ของคลื่นแบบทรงกลม

### วิดีโอเพื่อการศึกษา



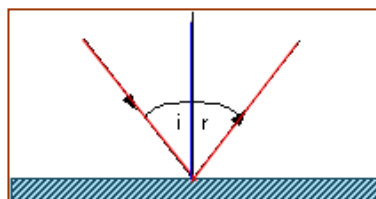
#### แสง

แสงคืออะไร เป็นคำถามคาใจนักฟิสิกส์มาหลายพันปี เซอร์ไอแซค นิวตัน สามารถแยกแสงออกเป็นสีรุ้งสำเร็จ และท่านเชื่อว่า แสงเป็นอนุภาค แต่โทมัส ยัง แสดงให้เห็นว่า แสงเป็นคลื่น โดยแสดงคุณสมบัติการแทรกสอดของแสง ต่อมาไอส์นไตน์ ประสานทั้งสองแนวคิด สรุปได้ว่า แสงเป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่น [คลิกครับ](#) 🌞

### 10-2 การสะท้อนของแสง

เมื่อคลื่นแสงเดินทางตกกระทบบัวกลางอีกชนิดหนึ่ง แสงบางส่วนหรือทั้งหมดจะสะท้อนกลับไม่ว่าผิวที่ตกกระทบบจะขรุขระหรือเป็นผิวโค้ง หรือเป็นผิวเรียบก็ตาม หลักการสะท้อนของแสงจะเป็นไปตามกฎการสะท้อนแสง 2 ข้อ ดังนี้

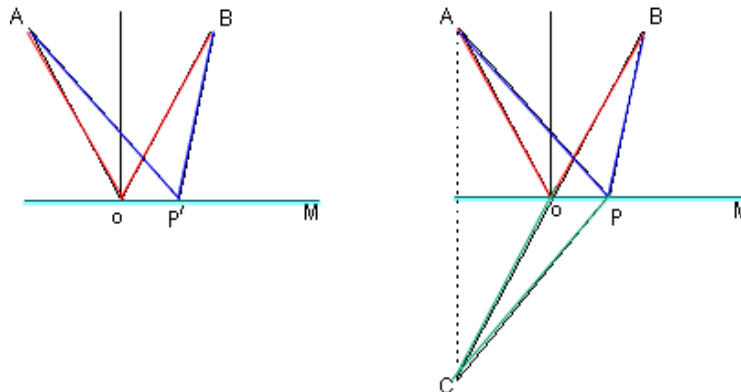
1. รังสีตกกระทบบ รังสีสะท้อนและเส้นปกติจะอยู่ในระนาบเดียวกันเสมอ
2. มุมตกกระทบบ (angle of incident) จะเท่ากับมุมสะท้อน (angle of reflection)



รูป10-2 การสะท้อนของแสง



จากรูป 10-3 แสงเดินทางจากจุด  $A$  ตกกระทบผิวรอยต่อที่จุด  $O$  แล้วสะท้อนมาที่จุด  $B$  ทำให้มุมตกกระทบ ( $i$ ) เท่ากับมุมสะท้อน ( $r$ )



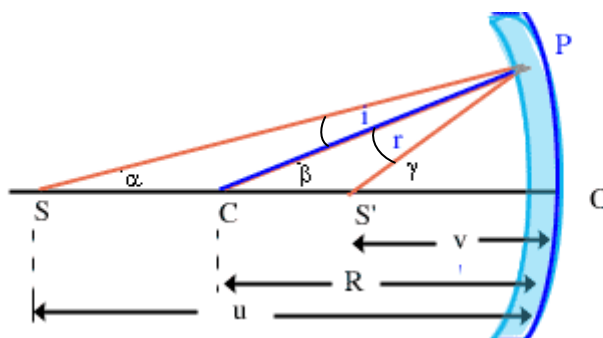
รูป 10-3 แสงสะท้อนจากจุด  $A$  ไปยัง  $B$  โดย  $AOB$  เป็นเส้นทางที่สั้นที่สุด

ถ้าแสงตกกระทบที่จุด  $P$  ผลก็คือมุม  $i$  ไม่เท่ากับมุม  $r$  ธรรมชาติของแสงรู้ได้อย่างไรว่า จะต้องมาตกกระทบที่จุด  $O$  ได้เพียงจุดเดียวเท่านั้น

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

จะเห็นว่า  $COB$  สั้นกว่า  $CPB$  (ในสามเหลี่ยม  $BCP$  ด้าน 2 ด้านของสามเหลี่ยมรวมกัน ย่อมยาวกว่าด้านที่สาม) หรือรังสี  $AOB$  มีทางเดินที่สั้นกว่ารังสี  $APB$  กฎการสะท้อนแสงอาจกล่าวได้อีก อย่างหนึ่งว่า การที่แสงเดินทางจากจุดหนึ่ง  $A$  ไปยังอีกจุดหนึ่ง  $B$  โดยอาศัยวิธีสะท้อนบนตัวกลาง ปราบกฎการสะท้อนจะเกิดขึ้นในลักษณะที่เส้นทางเดินของแสงระหว่างจุด 2 จุดนั้นโดยวัดผ่านจุดตกกระทบมีระยะทางสั้นที่สุด แต่แสงมีความเร็วคงที่ จึงกล่าวได้อีกว่า แสงจะเดินทางเป็นไปตามกฎการสะท้อน โดยที่ระยะทางนั้นเป็นระยะทางที่แสงใช้เวลาเดินทางน้อยที่สุด

เราสามารถประยุกต์กฎการสะท้อนแสง อธิบายการเกิดภาพของกระจกโค้ง (Spherical mirror) เริ่มด้วยกระจกโค้งเว้า



รูป 10-4 แสดงรังสีของแสงที่กระจกโค้งเว้า



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

จะหาความสัมพันธ์ของระยะวัตถุ ( $u$ ) ระยะภาพ ( $v$ ) และรัศมีความโค้งได้ดังนี้

สามเหลี่ยม  $S'CP$  :

$$\gamma = \beta + r$$

หรือ

$$r = \gamma - \beta \tag{10-1}$$

สามเหลี่ยม  $SCP$

$$i = \beta - \alpha \tag{10-2}$$

สมการ (10-1) เท่ากับสมการ (10-2) เพราะมุม  $i$  เท่ากับ มุม  $r$

$\alpha, \beta, \gamma$  ไม่สามารถใช้หาความสัมพันธ์ของระยะต่าง ๆ ได้โดยตรง จึงกำหนดเงื่อนไขให้  $\alpha, \beta, \gamma$  เป็นมุมที่มีค่าน้อย ๆ และกระจกโค้งมีรัศมีความโค้งมากจนประมาณได้ว่า เส้นโค้ง  $OP$  กับเส้นตรง  $OP$  คือเส้นเดียวกัน

$$\tan \alpha = \frac{OP}{SO} \approx \frac{OP}{u}$$

$$\tan \beta = \frac{OP}{CO} \approx \frac{OP}{R}$$

$$\tan \gamma = \frac{OP}{S'O} \approx \frac{OP}{v}$$

เพราะมุมมีค่าเล็กน้อย ๆ จะได้ค่า  $\tan$  ของมุมเล็ก ๆ นี้มีค่าใกล้เคียงกับค่าของมุมในหน่วยเรเดียน จากสมการ (10-1) และ (10-2) จะได้

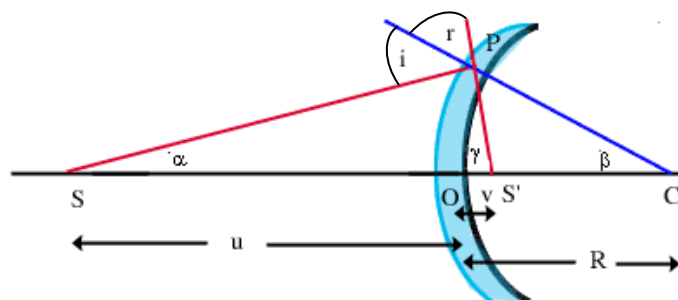
$$\beta - \alpha = \gamma - \beta$$

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

จะได้

$$\frac{2}{R} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \tag{10-3}$$

กรณีที่เป็นกระจกโค้งนูนสามารถหาความสัมพันธ์โดยวิธีเดียวกัน



รูป 10-5 รังสีตกกระทบบนและรังสีสะท้อนบนกระจกโค้งนูน



จะได้สูตร 
$$\frac{-2}{R} = \frac{1}{u} - \frac{1}{v} \quad (10-4)$$

จากสมการ (10-3) และ (10-4) สรุปการใช้เครื่องหมายเพื่อจำแนกชนิดกระจกได้ดังนี้

1. ระยะวัตถุ ( $u$ ) จะมีค่าเป็น + เมื่อวัตถุอยู่ด้านเดียวกับแสงที่ตกกระทบกระจก
2. ระยะภาพ ( $v$ ) จะเป็น + เมื่อเป็นภาพจริง เป็น - เมื่อเป็นภาพเสมือน
3.  $R$  จะเป็น + เมื่อเป็นกระจกโค้งเว้า เป็น - เมื่อเป็นกระจกโค้งนูน

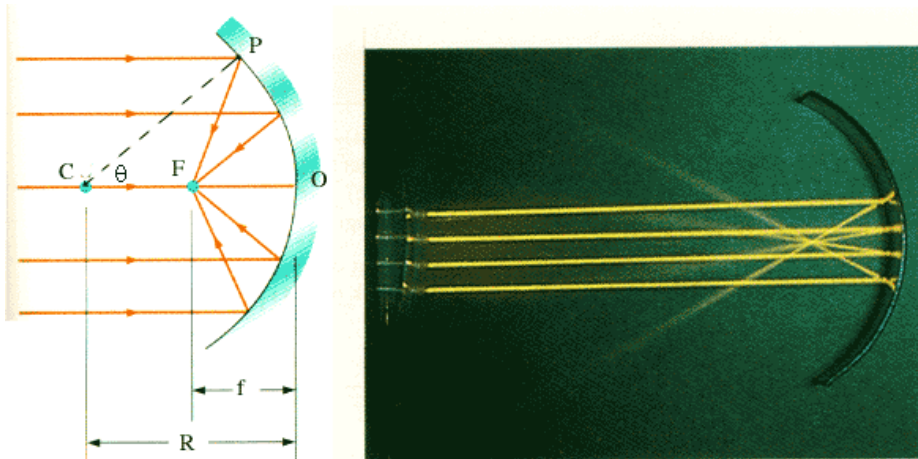
จากรูป 10-6 ถ้ารังสีตกกระทบเป็นรังสีขนาน รังสีทั้งหลายจะสะท้อนไปรวมกันที่จุด ๆ หนึ่ง เรียกว่าจุดโฟกัส (focal point) ให้กระจกมีรัศมีความโค้งมากจนถึงว่า  $OP$  เป็นเส้นตรง

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

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

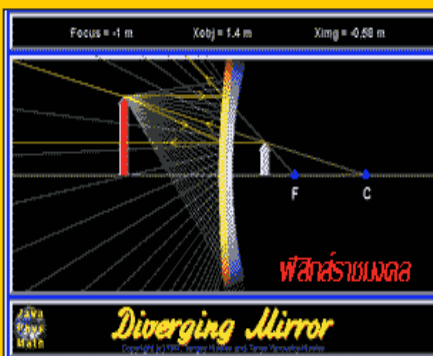
$$\tan 2\theta \approx 2\theta = \frac{OP}{OF}$$

จะได้  $OC = 2OF$  หรือ  $R = 2f$  (10-5)



รูป10-6 เมื่อรังสีขนานตกกระทบกระจกโค้ง

### การทดลองเสมือนจริง



#### ภาพที่เกิดจากกระจกโค้งนูน

เลื่อนวัตถุ(ลูกศรสีแดง)โดยใช้เมาส์เพื่อหาตำแหน่งที่ต้องการ ภาพที่ได้จากกระจกเว้า เป็นภาพเสมือนหัวตั้ง ปรากฏอยู่ทางด้านขวาของกระจกแสดงด้วยลูกศรสีเทา เส้นสีเหลืองแสดงเส้นทางของลำแสงภาพที่เกิดจากกระจกเว้า [คลิกที่นี่เพื่อเข้าสู่การทดลอง](#) 🔴

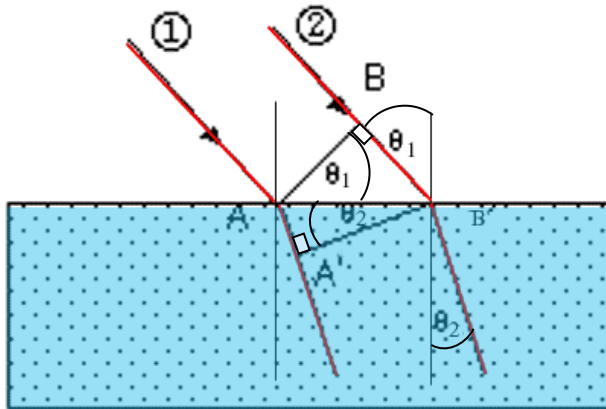


### 10-3 การหักเหของแสง

เมื่อแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นต่างกัน พบว่า

1. ความเร็ว ความยาวคลื่นของแสงจะเปลี่ยนไป แต่ความถี่จะไม่เปลี่ยน
2. แสงจะหักเหเข้าหาเส้นปกติเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อยสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นมาก แสงจะหักเหออกจากเส้นปกติเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางที่มีความหนาแน่นมากสู่ตัวกลางที่มีความหนาแน่นน้อย
3. แสงจะเดินทางผ่านสองตัวกลางเป็นเส้นตรง (ไม่มีการหักเห) เมื่อมุมตกกระทบ =  $0^\circ$

เราสามารถอธิบายการหักเหของแสงได้ดังนี้ให้แสงขนานตกกระทบกับรอยต่อของตัวกลาง ทำมุมตกกระทบ =  $\theta_1$  ความเร็วของแสงในอากาศ คือ  $c_1$  แสงหักเหในตัวกลางที่ 2 ทำมุมหักเห =  $\theta_2$  ความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 2 เป็น  $c_2$



รูป10-7 แสงหักเหเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากัน

พิจารณารังสี 2 เส้น เส้น ① และ ② รังสี ① จะตกกระทบที่ผิวรอยต่อตรงจุด A ขณะที่รังสี ② วิ่งมาถึงจุด B ขณะที่รังสี ② ตกกระทบผิวรอยต่อที่จุด B' รังสี ① จะเคลื่อนมาถึงจุด A' แสงใช้เวลา  $\Delta t$  เท่ากันใน การเดินทางจาก A ถึง A' และจาก B ถึง B' แต่ระยะ AA' น้อยกว่า BB' (เพราะแสงมีความเร็วเปลี่ยนไป)

ให้  $\theta_1$  เป็นมุมตกกระทบ  $\theta_2$  เป็นมุมหักเห

$$\text{จากรูป 10-7 จะได้ } \sin \theta_1 = \frac{BB'}{AB'} , \sin \theta_2 = \frac{AA'}{AB'}$$

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

$$\text{หรือ } \frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2} \quad (10-6)$$

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

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



สมการ (10-6) เขียนให้อยู่ในรูปดัชนีหักเหได้เป็น

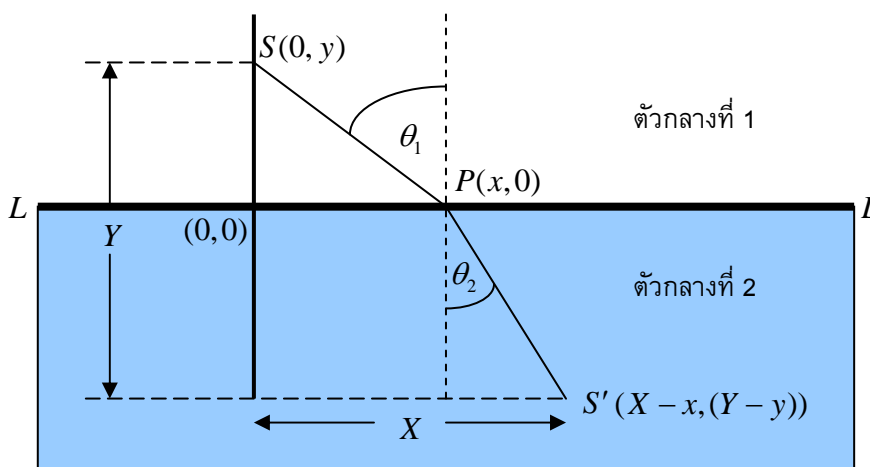
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (10-7)$$

ตาราง 10-1 ความเร็วของแสง และดัชนีหักเหของสารต่าง ๆ (เมื่อใช้แสงสีเหลืองผ่าน)

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

ในเรื่องการสะท้อนของแสง แสงจะใช้ระยะที่สั้นที่สุดหรือใช้เวลาน้อยที่สุดในการเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง หลักการนี้จะใช้กับกฎของสเนลได้หรือไม่

หลักการที่ว่าแสงเดินทางหักเหในระยะทางที่สั้นที่สุด เห็นจะใช้ไม่ได้แน่ เพราะจากรูป 10-8 จะเห็นว่า รังสีจาก  $S$  ไปยัง  $S'$  โดยหักเหผ่านผิว  $LL'$  ระยะ  $SPS'$  จึงไม่ใช่ระยะที่สั้นที่สุด จึงเหลือหลักการที่ใช้เวลาน้อยที่สุดที่จะนำมาพิจารณา



รูป 10-8 แผนภาพการหักเหของแสง



ให้  $c_1$  เป็นความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 1

$c_2$  เป็นความเร็วของแสงในตัวกลางที่ 2

$$\text{เวลาที่แสงเดินทางจาก } S \text{ ถึง } P = t = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{c_1}$$

$$\text{เวลาที่แสงเดินทางจาก } P \text{ ถึง } S' = t' = \frac{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2}}{c_2}$$

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

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

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

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

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

เป็นเงื่อนไขที่ทำให้แสงใช้เวลาเดินทางน้อยที่สุด จะเห็นว่าสอดคล้องกับกฎของสเนล เราเรียกกฎนี้ว่า หลักการของเฟอร์เมท (Fermat's principle) ตามชื่อนักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสซึ่งตั้งกฎนี้

## บทความออนไลน์



### เส้นใยนำแสง

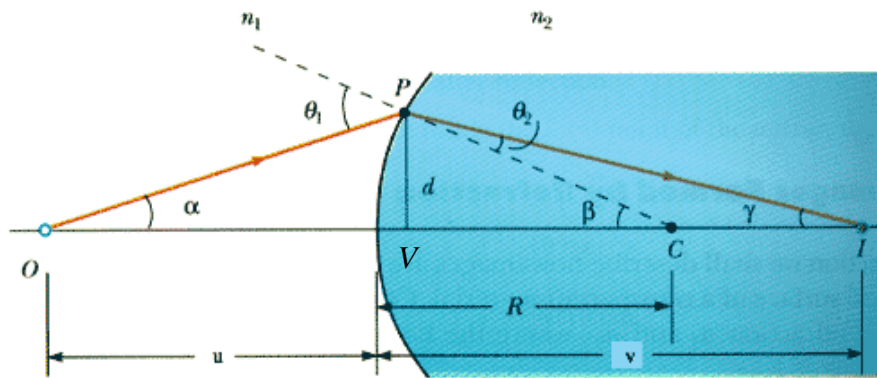
ความรู้พื้นฐานของแสงเช่น การสะท้อน และการหักเห นำไปสู่ความก้าวหน้าอันมากมายในงานวิศวกรรม รวมทั้งการประดิษฐ์เส้นใยนำแสงด้วย ภาพของผึ้งถูกส่งผ่านมาทางเส้นใยนำแสง ปัจจุบันเส้นใยนำแสง ถูกใช้ในการสื่อสารแทบทุกประเภท [อ่านต่อครับ](#) 🌟





เมื่อแสงตกกระทบบนผิวรอยต่อบนตัวกลางที่มีผิวโค้ง สามารถใช้หลักการหักเหแสงอธิบายการเกิดภาพได้

จากภาพเป็นตัวกลาง 2 ชนิด มีค่าดัชนีหักเหเป็น  $n_1$  และ  $n_2$  ตามลำดับ ให้  $n_1 < n_2$  ( $n_1$  อาจเป็นอากาศ,  $n_2$  อาจเป็นแก้วที่มีผิวโค้ง)  $O$  เป็นวัตถุวางอยู่หน้าผิวรอยต่อโค้งนูน แสงจาก  $O$  จะตกกระทบบนผิวรอยต่อที่จุด  $P$  ใด ๆ ด้วยมุม  $\theta_1$  จะหักเหในตัวกลางที่ 2 ทำมุมหักเห  $\theta_2$  เกิดภาพที่ตำแหน่ง  $I$  ให้รัศมีความโค้งของผิวรอยต่อมีค่ามาก ๆ  $= R$  มุม  $\alpha, \beta$  และ  $\gamma$  เป็นมุมเล็ก



รูป 10-9 การเกิดภาพที่ผิวโค้งนูน

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

คือ  $\theta_1 = \alpha + \beta$

$\beta = \theta_2 + \gamma$

หรือ  $\theta_2 = \beta - \gamma$

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

เมื่อ  $\theta_1$  และ  $\theta_2$  เป็นมุมเล็ก ๆ แทนค่า  $\theta_1, \theta_2$

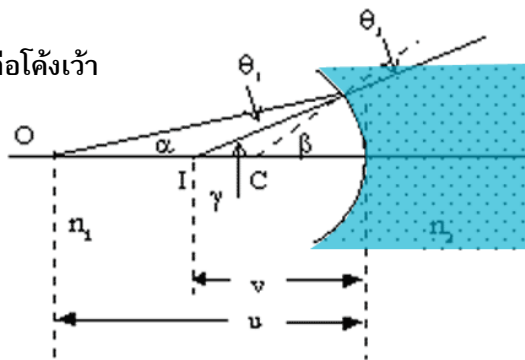
$$n_1(\alpha + \beta) = n_2(\beta - \gamma)$$

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

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

จะได้  $\frac{n_1}{u} + \frac{n_2}{v} = \frac{n_2 - n_1}{R}$  (10-8)

ถ้าผิวรอยต่อโค้งเว้า



รูป 10-10 การเกิดภาพที่ผิวโค้งเว้า



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

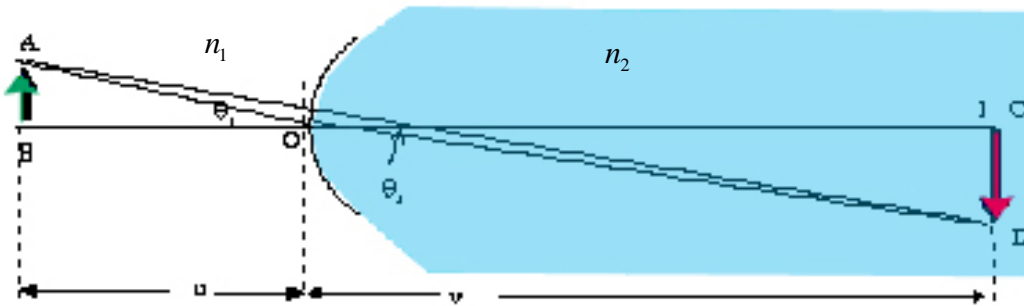
$$\beta = \theta_2 + \gamma \rightarrow \theta_2 = \beta - \gamma$$

จากกฎของสเนล  $n_1\theta_1 \approx n_2\theta_2$

$$\begin{aligned} n_1(\beta - \alpha) &= n_2(\beta - \gamma) \\ -n_1\alpha + n_2\gamma &= (n_2 - n_1)\beta \\ \frac{n_1}{u} - \frac{n_2}{v} &= \frac{n_2 - n_1}{-R} \end{aligned} \quad (10-9)$$

จะได้สูตรเหมือนกับใช้ผิวโค้งนูนรับแสง ต่างกันเพียงค่า  $R$  และ  $v$  เป็นลบ

**ตัวอย่าง 10-1** กำหนดให้  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1.5$  รัศมีความโค้ง  $R = 0.1$  m จงหาตำแหน่งภาพของวัตถุ  $AB$  ซึ่งอยู่ห่างจากจุด  $O$  เป็นระยะ  $0.3$  m



รูป 10-11 ตัวกลางผิวโค้งนูนในตัวอย่าง 10-1

**หลักการคำนวณ** เนื่องจากใช้ผิวโค้งนูนรับแสงจากสมการ 10-8

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

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

จะได้  $v = 0.90$  m

จากตัวอย่าง 10-1 ถ้าต้องการหากำลังขยายของผิวโค้ง สามารถหาได้จาก

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

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

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

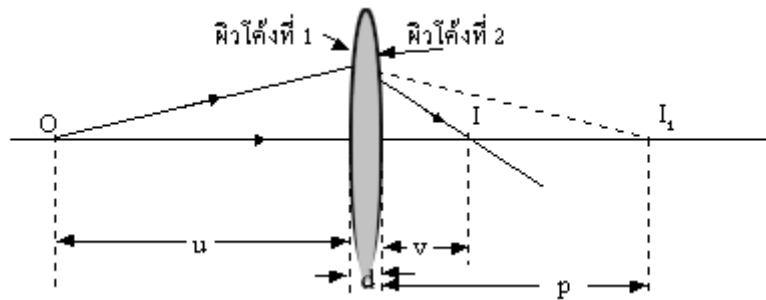
สามารถเขียนให้อยู่ในรูปดัชนีหักเหได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} \cong \frac{vn_1}{un_2} \quad (10-10)$$



เลนส์บางทำด้วยแก้วหรือพลาสติกใสผิวเป็นส่วนโค้งของทรงกลมทั้งสองด้านหรือเป็นผิวระนาบด้านหนึ่ง ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะเลนส์ที่ผิวโค้งทั้งสองอยู่ชิดกันมากจนไม่ต้องคำนึงถึงความหนาของเลนส์

เมื่อวางวัตถุห่างจากเลนส์เป็นระยะ  $u$  ที่จุด  $O$  เลนส์มีรัศมีความโค้งที่ผิวที่ 1 เป็น  $R_1$  และผิวโค้งที่สองเป็น  $R_2$  แสงจากวัตถุจะหักเหผ่านผิวโค้งที่ 1 ทำให้เกิดภาพที่ตำแหน่ง  $I_1$  ห่างจากผิวโค้งเป็นระยะ  $p$  ภาพ  $I_1$  นี้จะเป็นวัตถุสำหรับผิวโค้งที่ 2 แสงจากภาพ  $I_1$  จะผ่านผิวโค้งที่ 2 เกิดเป็นภาพสุดท้ายที่ตำแหน่ง  $I$  ซึ่งห่างจากเลนส์เป็นระยะ  $v$  ดังรูป 10-12



รูป 10-12 การเกิดภาพของเลนส์บาง

ให้เลนส์นี้วางอยู่ในตัวกลางซึ่งมีดัชนีหักเหเท่ากับ  $n_s$  วัสดุที่ใช้ทำเลนส์มีค่าดัชนีหักเหเท่ากับ  $n$  ผิวโค้งที่ 1 ใช้ส่วนโค้งนูนเป็นส่วนรับแสง ค่า  $R_1$  จึงมีค่าเป็น + ความหนา ( $d$ ) ของเลนส์น้อยมากจนตัดทิ้งได้ อาศัยสมการ (10-8) จะได้

$$\frac{n_s}{u} + \frac{n}{p} = \frac{n - n_s}{R_1} \quad (10-11)$$

เมื่อแสงหักเหผ่านผิวโค้งที่ 1 จะกระทบกับผิวโค้งที่ 2 ซึ่งใช้ส่วนเว้ารับแสง ค่า  $R_2$  จึงมีค่าเป็น - วัตถุในกรณีนี้คือภาพที่เกิดจากผิวโค้งที่ 1 จึงเป็นวัตถุเสมือนมีค่าเป็น - เช่นกัน

$$\frac{n}{-p} + \frac{n_s}{v} = \frac{n_s - n}{-R_2} \quad (10-12)$$

นำสมการ (10-11) บวกกับสมการ (10-12)

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{n - n_s}{n_s} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (10-13)$$

เรียกสมการ (10-13) ว่าเป็นสมการของเลนส์บาง (thin lens equation) เทอมด้านซ้ายมือสามารถแทนได้ด้วย  $\frac{1}{f}$  เมื่อ  $f$  คือความยาวโฟกัสของเลนส์

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



**ตัวอย่าง10-2** เลนส์บาง 2 ชั้นประกบกัน เลนส์ชั้นที่หนึ่งเป็นเลนส์นูนมีรัศมีความโค้ง 16 cm และ 24 cm ดัชนีหักเหของเลนส์เท่ากับ 1.6 เลนส์ชั้นที่สองเป็นเลนส์เว้ารัศมีความโค้ง 32 cm และ 48 cm ดัชนีหักเหเท่ากับ 1.48 จงหาความยาวโฟกัสรวม และกำลังของเลนส์ชุดนี้

**หลักการคำนวณ** ให้  $f_1$ ,  $f_2$  เป็นความยาวโฟกัสของเลนส์นูนและเลนส์เว้าตามลำดับ

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

$$f_1 = 16 \text{ cm}$$

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

$$f_2 = -40 \text{ cm}$$

ให้  $F$  เป็นความยาวโฟกัสรวมของเลนส์ทั้งสอง

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

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

$$F = +26.67 \text{ cm หรือ } 0.2667 \text{ m}$$

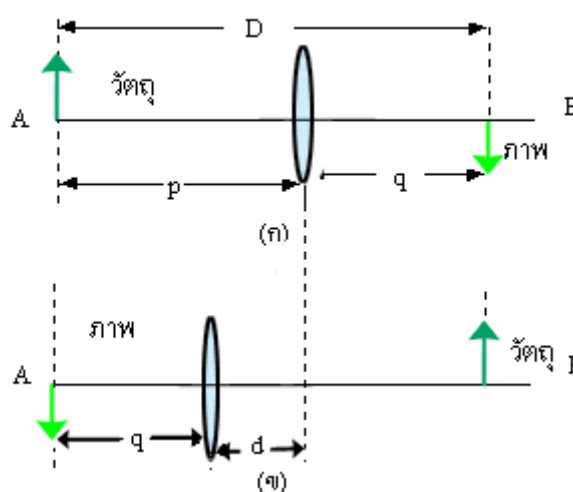
กำลังของเลนส์  $= \frac{1}{F}$

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

$$= +3.75 \text{ diopter}$$

**ตัวอย่าง10-3** โฟกัสสังยุค (conjugate foci) คือจุดสองจุด คือ  $A$  และ  $B$  ซึ่งบอกตำแหน่งของวัตถุและตำแหน่งภาพ, ตำแหน่งวัตถุและภาพทั้งสองนี้สามารถสลับกันได้ โดยการเลื่อนตำแหน่งเลนส์ไปจากเดิมเป็นระยะ  $d$  จงแสดงว่าความยาวโฟกัสของเลนส์นูนนี้คือ  $f = \frac{D^2 - d^2}{4D}$

**หลักการคำนวณ**



รูป 10-13 การเกิดโฟกัสสังยุค



รูป 10-13 (ก) ระยะวัตถุ ( $p$ ) และระยะภาพ ( $q$ ) มีความสัมพันธ์กับระยะ  $AB$  ดังนี้

$$D = p + q$$

รูป 10-13 (ข) เมื่อสลับตำแหน่งภาพและวัตถุต้องเลื่อนเลนส์ไปจากเดิม  $d$

$$d = p - q$$

จะได้ระยะวัตถุ

$$p = \frac{D+d}{2}$$

ระยะภาพ

$$q = \frac{D-d}{2}$$

ความยาวโฟกัสของเลนส์ คือ

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

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

### ทดสอบก่อนและหลังเรียน

วิธีทำให้ใส่ชื่อ สกุล เลือกวิชาที่สอบ และจำนวนข้อ แต่ต้องไม่เกินจากที่กำหนดไว้ เช่น กำหนดไว้ 10 ข้อ เวลาเลือกจำนวนข้อ ให้เลือก 5 และ 10 ข้อไม่เกินจากนี้ เป็นต้นเมื่อทำเสร็จสามารถดูคะแนนจากรายละเอียดผู้ทำข้อสอบได้ทันที

เรื่องทัศนศาสตร์เรขาคณิต

คลิกเข้าสู่ [การทดสอบก่อนและหลังเรียนครับ](#) 🌟

### บรรยายลงในกระดานฟิสิกส์ราชมงคล



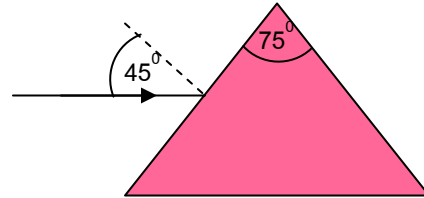
คุณเห็นเหรียญลอยได้เมื่อมองผ่านรูที่เกิดจากกระจกเว้าพาราโบลา สองอันประกบกัน แต่ละอันมีความยาวโฟกัส 7.5 cm เมื่อประกบกันแล้ว จุดศูนย์กลางของกระจกห่างกัน 7.5 cm ดังรูป ถ้าเราวางเหรียญที่ศูนย์กลางของกระจกโค้งด้านใน ภาพของเหรียญจะปรากฏขึ้นที่รูทางด้านบน คุณอธิบายได้หรือไม่ว่า ทำไม และมีเหตุผลทางแสงอย่างไร ให้บรรยายลงใน [กระดานฟิสิกส์ราชมงคลใหม่](#) 🌟



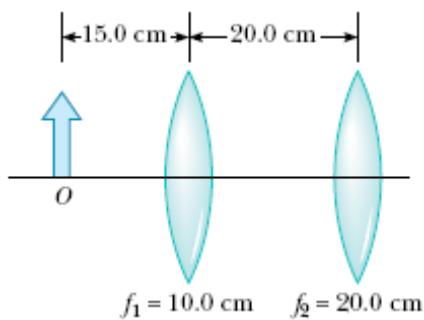
## แบบฝึกหัดเรื่องทัศนศาสตร์เรขาคณิต

1. ถ้าวางวัตถุที่มีความสูง 10 cm ไว้หน้ากระจกนูนซึ่งมีรัศมีความโค้ง 50 cm โดยวางให้ห่างจากหน้ากระจกเป็นระยะ 100 cm จงหาความสูงของภาพว่ามีขนาดเท่าใด [ตอบ 2 cm]

2. ให้ลำแสงตกกระทบบนด้านข้างของปริซึมมุมยอด  $75^\circ$  โดยให้มุมตกกระทบบนเป็น  $45^\circ$  ให้ค่าดัชนีหักเหของสารที่ใช้ทำปริซึมมีค่า 1.4 ค่า sine ของมุมหักเหของลำแสงออกจากปริซึมมีค่าเท่าไร [ตอบ 0.99]



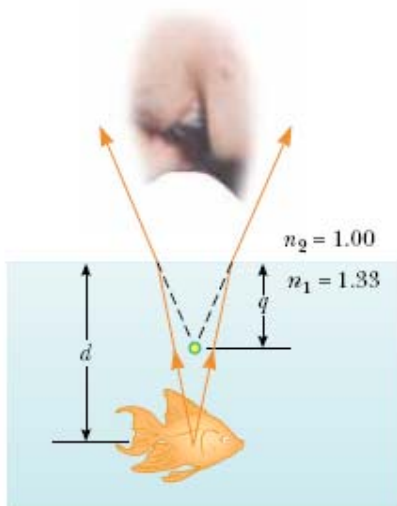
- 3.



จากรูป ระบบประกอบด้วยเลนส์นูน 2 อัน วางห่างกัน 20 cm ความยาวโฟกัสเท่ากับ 10 cm และ 20 cm ตามลำดับ ถ้าวัตถุวางห่างจากเลนส์นูนอันแรกเท่ากับ 15 cm จงหาตำแหน่งสุดท้ายของภาพที่เกิดขึ้น [ตอบ อยู่ทางขวามือของเลนส์นูนอันที่ 2 ห่างจากเลนส์ 6.67 cm]

4. วางวัตถุไว้หน้ากระจกโค้งซึ่งมีความยาวโฟกัส 20 cm ปรากฏว่าได้ภาพเสมือนโดยมีกำลังขยาย 0.1 จงหาระยะวัตถุ [ตอบ 180 cm]

- 5.

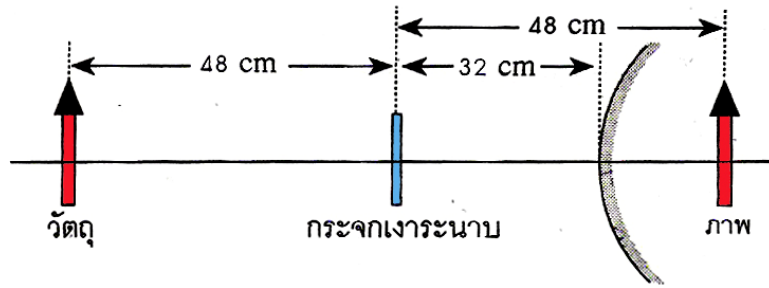


ปลาทองตัวเล็กกำลังว่ายน้ำอยู่ในน้ำ จงหาความลึกปรากฏของตัวปลา ถ้าผู้มองมองลงมาในแนวตั้งเหนือตัวปลา [ตอบ  $-0.752d$ ]

6. ในการวัดความยาวของเส้นใยนำแสง (optical fiber) ด้วยวิธีทางแสง โดยเปิดแสงให้เข้าไปในเส้นใยนำแสงเป็นเวลาชั่วคราวแล้วปิดแสง วัดระยะเวลาตั้งแต่เริ่มเปิดแสงจนกระทั่งรับแสงสะท้อนได้ที่ตำแหน่งต้นทางเป็นเวลา  $15 \times 10^{-6}$  s จงหาว่าเส้นใยนำแสงนี้ยาวเท่าใด กำหนดให้ค่าดัชนีหักเหแสงของเส้นใยนำแสงเป็น 1.5 และอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศคือ  $3 \times 10^8$  m/s [ตอบ 1,500 m]



7.

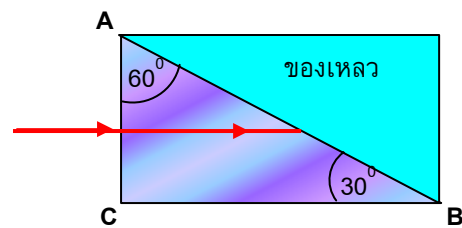


เมื่อจัดอุปกรณ์ตามรูป พบว่า ภาพที่เกิดจากกระจกเงาระนาบกับกระจกนูนไม่มีพาราลแลกซ์ (จะเกิดภาพที่ตำแหน่งเดียวกัน) ความยาวโฟกัสของกระจกนูนคือ [ตอบ 20 cm]

8. เลนส์นูนบางความยาวโฟกัส 15 cm วางวัตถุไว้หน้าเลนส์ทำให้เกิดภาพเสมือนขนาด 3 เท่าของวัตถุ วัตถุและภาพอยู่ห่างกันเท่าใด [ตอบ 20 cm]

9. มุมวิกฤติสำหรับสารโปร่งใสชนิดหนึ่งในอากาศมีค่าเท่ากับ  $45^\circ$  ความเร็วแสงในสารโปร่งใสนี้มีค่าเท่าใด [ตอบ  $2.12 \times 10^8$  m/s]

10. แสงตกตั้งฉากกับด้าน AC ของปริซึม ดังรูป ถ้าด้าน AB ของปริซึมสัมผัสอยู่กับของเหลวซึ่งมีค่าดัชนีหักเห 1.3 จงหาค่าความเร็วของแสงในปริซึมเพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดบนด้าน AB [ตอบ น้อยกว่า  $2 \times 10^8$  m/s]



<b>หนังสืออิเล็กทรอนิกส์</b>	
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
<b>การทดลองเสมือน</b>	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
<b>แบบฝึกหัดกลาง</b>	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(	คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
<b>ความรู้รอบตัว</b>	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	



 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1</b> <span style="float: right;"></span>	
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
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2</b> <span style="float: right;"></span>	
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
 <b>การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป</b> <span style="float: right;"></span>	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

