

## อุปกรณ์เชิงแสง

### 1. ตัวกั้นช่องเปิด (Aperture stop)

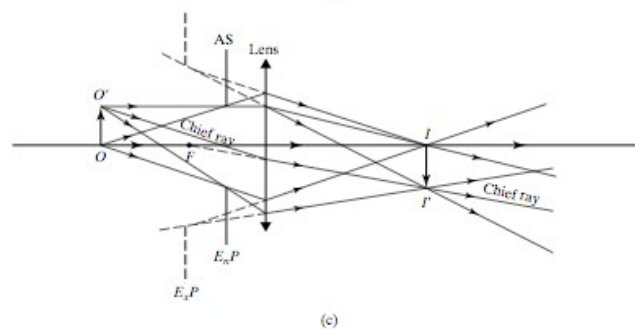
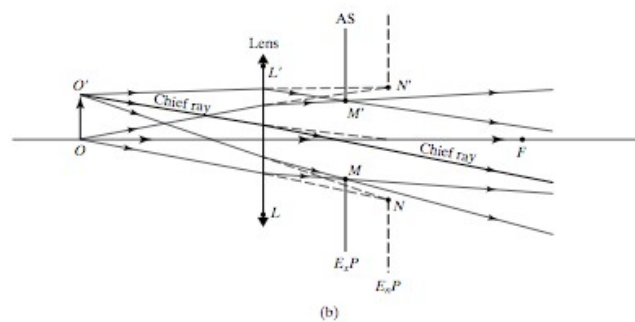
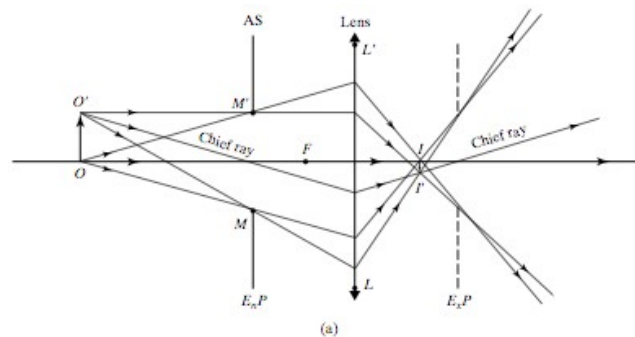
เป็นวัสดุทึบที่จำกัดแสงแค่เพียงบางส่วนให้เข้าไปสู่ระบบ ซึ่งอาจเป็นช่องเปิดกลมหน้าเลนส์ (iris diaphragm) หรืออาจจะเป็นขนาดของเลนส์ ตัวกั้นช่องเปิดมักอยู่ด้านหน้าของระบบเชิงแสง มีหน้าที่จำกัดปริมาณของแสงที่เข้าไปสู่ระบบและสามารถช่วยปรับความลึกของโฟกัสอีกด้วย ถ้าระบบประกอบไปด้วยหลายตัวกั้น ให้พิจารณาตัวกั้นที่ทำมุมเปิดน้อยที่สุดเป็นตัวกั้นช่องเปิด

#### 1.1 รูม่านตาทางเข้า (Entrance pupil)

เป็นภาพของตัวกั้นช่องเปิดที่แสงมองเห็น สามารถหาขนาดและตำแหน่งได้จากภาพที่เกิดจากตัวกั้นช่องเปิดในทิศทางย้อนกลับกับทางเดินของแสง โดยรังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลางของรูม่านตาทางเข้า เรียกว่า รังสีสำคัญ (chief ray)

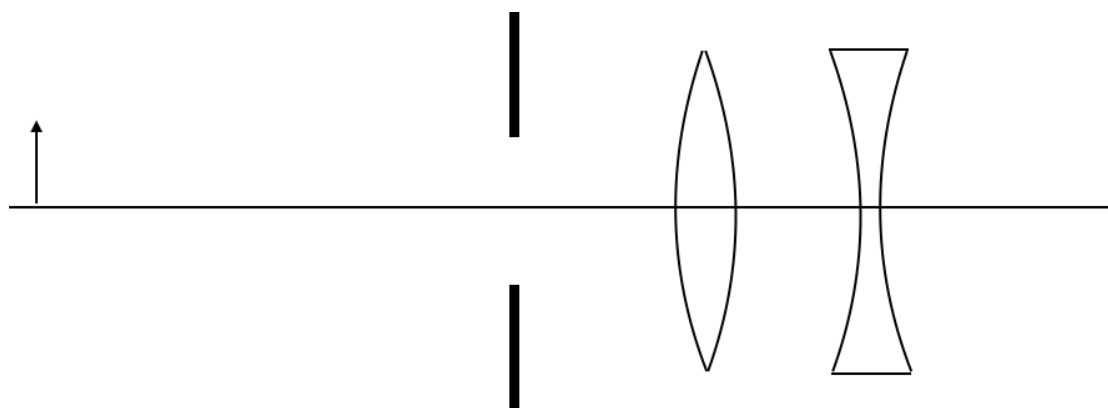
#### 1.2 รูม่านตาทางออก (Exit pupil)

เป็นภาพของตัวกั้นช่องเปิดที่ผู้สังเกตมองเห็น สามารถหาขนาดและตำแหน่งได้จากภาพที่เกิดจากตัวกั้นช่องเปิดในทิศทางไปทางเดียวกับทางเดินของแสง



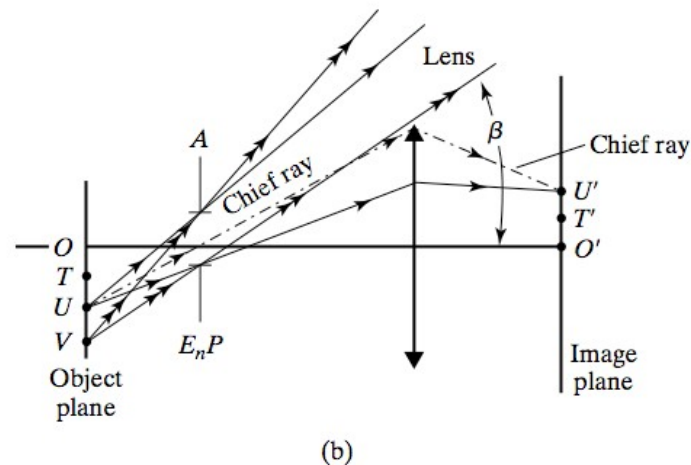
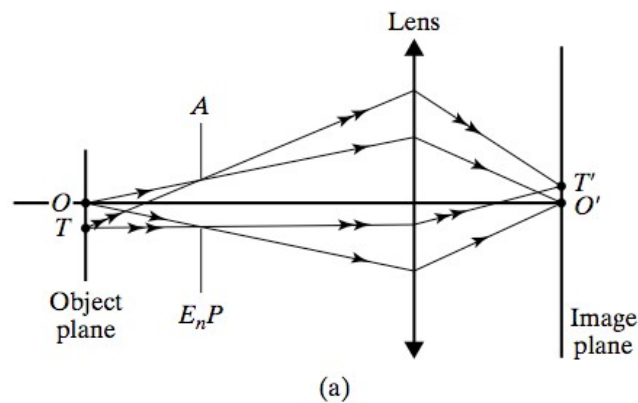
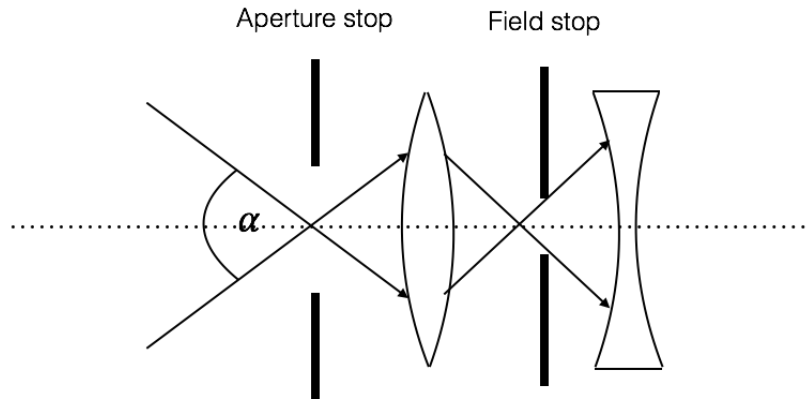
**ตัวอย่าง** ระบบเชิงทัศนศาสตร์ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ดังภาพ โดยมี ตัวกั้นมีช่องเปิดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 ซม. เลนส์นูนเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ความยาวโฟกัส 6 ซม. และเลนส์เว้า เส้นผ่านศูนย์กลาง 6 ซม. ความยาวโฟกัส -4 ซม. ถ้ามีวัตถุอยู่ห่างจากตัวกั้นเป็นระยะ 10 ซม. และตัวกั้นห่างจากเลนส์นูน 2 ซม. และเลนส์นูนห่างจากเลนส์เว้า 1 ซม. จงหาว่า

1. ตัวกั้นช่องเปิด (aperture stop) สำหรับวัตถุชิ้นนี้อยู่ที่ตำแหน่งใดและมีขนาดเท่าไร?
2. รูม่านตาทางเข้า (entrance pupil) อยู่ที่ตำแหน่งใดและมีขนาดเท่าไร?
3. รูม่านตาทางออก (exit pupil) อยู่ที่ตำแหน่งใดและมีขนาดเท่าไร?
4. ภาพสุดท้ายของวัตถุผ่านระบบเชิงแสงนี้อยู่ที่ตำแหน่งใด



## 2. ตัวกั้นสนามการมอง (Field stop)

เป็นวัสดุทึบที่จำกัดขนาดมุมของสนามการมอง (field of view) มักอยู่ในระนาบของภาพ โดยตัวกั้นสนามการมองไม่มีผลต่อปริมาณแสง แต่มีผลต่อการมุมของสนามการมอง (angular field of view) ซึ่งหาได้จากมุมของรังสีสำคัญ (Chief ray) ที่มากที่สุดซึ่งผ่านตัวกั้นสนามการมอง

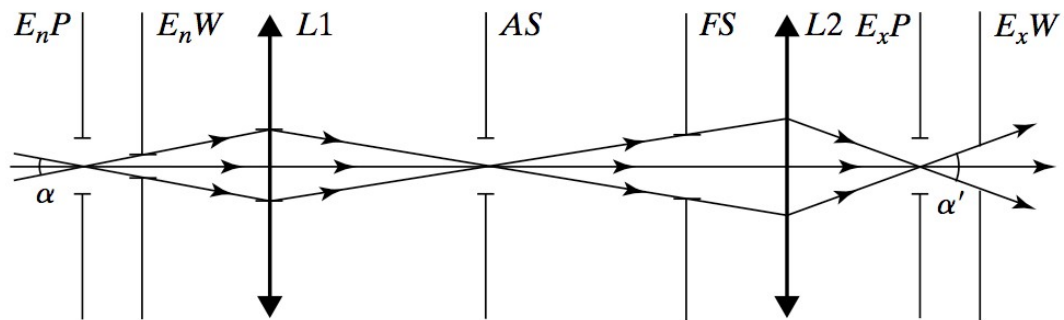


### 2.1 หน้าต่างทางเข้า (Entrance window)

เป็นภาพของตัวกั้นสนามการมองที่แสงมองเห็น โดยสามารถหาขนาดและตำแหน่งได้จากภาพที่เกิดจากตัวกั้นสนามในทิศทางย้อนกลับกับทางเดินของแสง

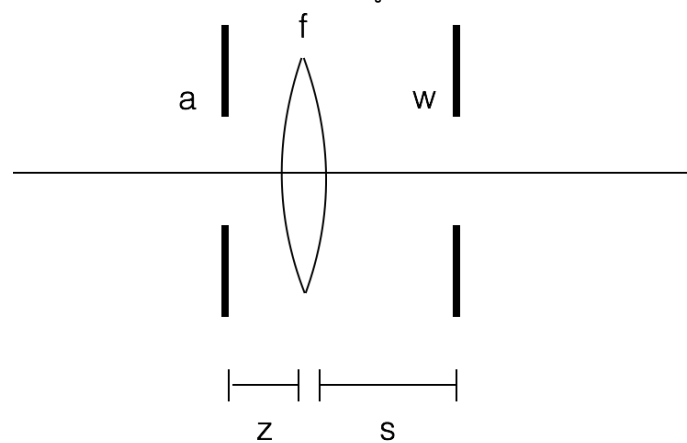
### 2.2 หน้าต่างทางออก (Exit window)

เป็นภาพของตัวกั้นสนามการมองที่ผู้สังเกตมองเห็น โดยสามารถหาขนาดและตำแหน่งได้จากภาพที่เกิดจากตัวกั้นสนามในทิศทางเดียวกันกับทางเดินของแสง



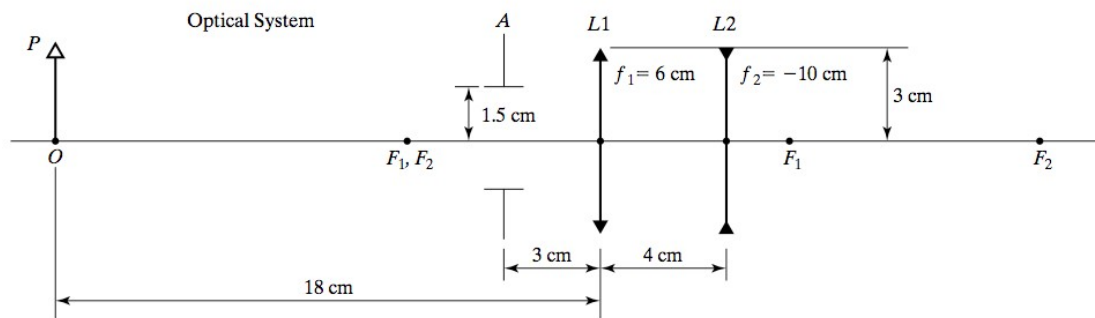
### ตัวอย่าง

จงหาดำแหน่งและขนาดของ Aperture stop, entrance pupil, exit pupil, field stop, entrance window และ exit window ในระบบเลนส์เดี่ยวดังรูป



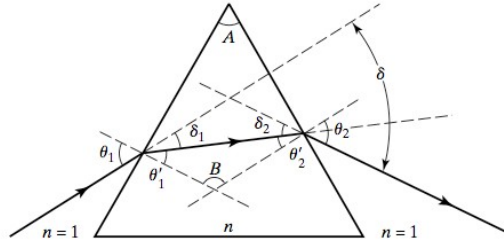
**ตัวอย่าง** ระบบเชิงแสงดั่งภาพด้านล่างประกอบไปด้วยเลนส์นูนบาง  $L1$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm และความยาวโฟกัส 6 cm และเลนส์เว้าบาง  $L2$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 cm และความยาวโฟกัส -10 cm และช่องเปิด  $A$  ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 cm โดยช่องเปิด  $A$  วางหน้าเลนส์  $L1$  เป็นระยะ 3 cm และเลนส์  $L1$  วางอยู่หน้าเลนส์  $L2$  เป็นระยะ 4 cm วัตถุขนาด 3 cm ถูกวางอยู่หน้า  $L1$  18 cm จงตอบคำถามต่อไปนี้

- จงพิจารณาว่าองค์ประกอบใด ( $A$ ,  $L1$ ,  $L2$ ) เป็นตัวกั้นช่องเปิด (Aperture Stop)
- จงหาตำแหน่งและขนาดของรูม่านตาทางเข้าและรูม่านตาทางออก
- จงหาตำแหน่งและขนาดของภาพที่เกิดจากการหักเหผ่านเลนส์  $L1$
- จงหาตำแหน่งและขนาดของภาพที่เกิดจากการหักเหผ่านเลนส์ทั้งคู่



### 3. ปริซึม

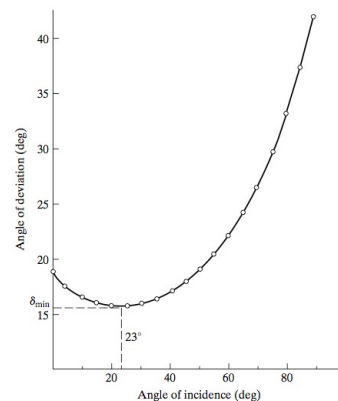
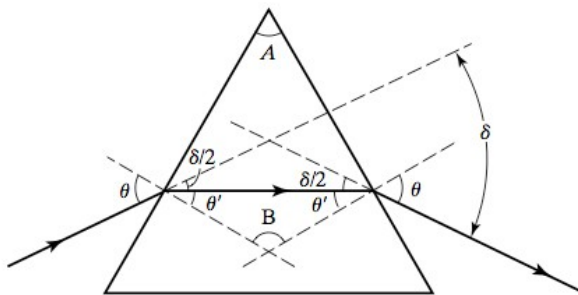
ปริซึมคือวัสดุ (มักใช้แก้ว) ที่มีหน้าตัดเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม โดยมีมุมยอดของปริซึม  $A$  และดัชนีหักเห  $n$  เป็นตัวกำหนดคุณลักษณะ สิ่งที่เราสนใจจากการหักเหของแสงผ่านปริซึมคือมุมเบี่ยงเบน  $\delta$  ซึ่งถูกนิยามให้เป็นมุมของลำแสงหักเหสุดท้ายและลำแสงตกกระทบบแรกดังภาพ



จากภาพด้านบนถ้าเราทำ variation (เปลี่ยนค่ามุมตกกระทบบแรก  $\theta_1$ ) จนกระทั่งค่ามุมเบี่ยงเบน  $\delta$  มีค่าน้อยที่สุดจะทำให้เราสามารถบอกสมบัติของปริซึมได้ ตัวอย่างเช่นการคำนวณโดยใช้ปริซึมแก้วที่มีมุมปริซึม  $A = 30$  องศา และค่าดัชนีหักเหเท่ากับ  $n = 1.50$  ได้ผลดังกราฟด้านล่าง

เพื่อที่จะหาสูตรมุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุดเราสามารถใช้แคลคูลัสในการหามุมน้อยที่สุดนี้ได้ แต่ในขั้นนี้เราจะใช้เพียงเหตุผลง่ายๆในการพิจารณา ในเงื่อนไขที่ทำให้เกิดมุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุดนั้น ถ้าเราลองสมมติให้มุมตกกระทบบแรกและมุมหักเหสุดท้ายไม่เท่ากัน  $\theta_1 \neq \theta_2$  ในกรณีนี้ถ้าเราเปลี่ยนมุมตกกระทบบแรกให้มีค่าเท่ากับมุมหักเหสุดท้าย เราจะพบว่ามุมหักเหสุดท้ายก็จะกลายเป็นมุมตกกระทบบแรก (เพราะนี่คือการย้อนลำแสงกลับจากเหตุการณ์แรก) ดังนั้นแปลว่าในกรณีนี้มุมเบี่ยงเบนจะสามารถมีได้สองค่าที่มีค่าไม่เท่ากัน ซึ่งขัดแย้งกับเงื่อนไขของการมีมุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุด ดังนั้นเพื่อหลีกเลี่ยงข้อขัดแย้งนี้เราจึงสรุปได้ว่า จังหวะที่เกิดมุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุดจะมีมุมตกกระทบบแรกและมุมหักเหสุดท้ายเท่ากัน  $\theta_1 = \theta_2$  ดังแสดงในภาพด้านล่าง เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของมุมเราจะได้ว่า

$$n = \frac{\sin [(A + \delta)/2]}{\sin (A/2)}$$



การหามุมเบี่ยงเบนของปริซึมมีประโยชน์ในการหาดัชนีหักเหของวัสดุใดๆ (ตัวอย่างเช่นปฏิบัติการฟิสิกส์พื้นฐานที่นักศึกษาเคยผ่านมาแล้ว)

### การกระจายแสงของปริซึม (Dispersion)

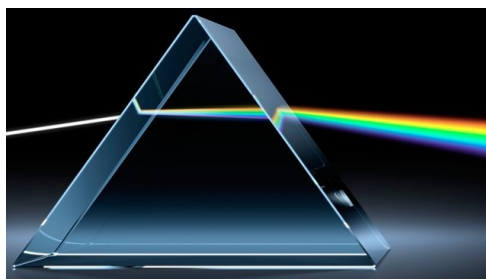
เราได้พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างมุมเบี่ยงเบนน้อยที่สุดของปริซึมกับดัชนีหักเหไปแล้ว อย่างไรก็ตามการทดลองจริงเราพบว่ามุมเบี่ยงเบนที่ออกมา นั้นมีค่าต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่น เมื่อส่องแสงขาวซึ่งประกอบจากแสงหลายๆความยาวคลื่นจึงเกิดการกระจายแสงในแต่ละสีขึ้น (เราพบความจริงข้อนี้ในสมัยของนิวตัน) การกระจายแสงของปริซึมนั้นมีที่มาจากดัชนีหักเหที่ไม่เท่ากันของแต่ละความยาวคลื่น (สมบัติการตอบสนองต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของวัสดุใดๆมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละความยาวคลื่นเนื่องจากสมบัติทางควอนตัมของผลึกหรือโมเลกุลนั้นๆ)

ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีหักเหและความยาวคลื่นนั้นขึ้นกับสมบัติของแต่ละตัวกลางซึ่งยากต่อการใช้ประโยชน์โดยตรง โดยทั่วไปเรามักสรุปเป็นสูตร empirical (เชิงปรากฏการณ์) ด้วยการประมาณในค่าความยาวคลื่น และเขียนในรูปของตัวแปร A, B, C ดังนี้

$$n_\lambda = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots$$

สูตรนี้เรียกว่าสูตรของโคชี Cauchy's formula

ดังนั้นเมื่อพิจารณาของสนเกลส์  $n \sin \theta_i = n_\lambda \sin \theta_r$  จะได้ว่ามุมหักเหขึ้นกับความยาวคลื่นด้วย จากสมการด้านบนเมื่อความยาวคลื่นมีค่ามากขึ้นแสงสี\_\_\_\_\_ จะสังเกตว่าดัชนีหักเหมีค่า \_\_\_\_\_ ส่งผลให้มุมหักเหมีค่า \_\_\_\_\_ ทำให้ในรูปเราสังเกตเห็นแสงสี\_\_\_\_\_ อยู่ด้าน \_\_\_\_\_



การกระจายแสง (dispersion) นิยามเป็น  $\frac{dn}{d\lambda}$  ซึ่งจากความสัมพันธ์ด้านบนเราสามารถประมาณโดยพิจารณาเฉพาะเทอมแรกได้เป็น \_\_\_\_\_

ในการทดลองค่า A, B (คิดเฉพาะสองเทอมแรกในสูตรของโคชี) สามารถหาได้จากการทำการทดลองเพื่อหาดัชนีหักเหของแสงสองความยาวคลื่นแล้วแก้สมการสองตัวแปรเพื่อหาค่าคงที่ เช่นเดียวกันถ้าต้องการค่า A, B, C ต้องทำการทดลองเพื่อหาดัชนีหักเหของแสงสามความยาวคลื่นแล้วแก้สมการสามตัวแปรเพื่อหาค่าคงที่ ซึ่งค่าความยาวคลื่นมาตรฐานที่ใช้กันมักกำหนดเป็นตำแหน่งที่มีความยาวคลื่นมากที่สุด, น้อยสุดและตรงกลางที่สุดของแสงที่เรามองเห็นได้ (visible light) เส้นเหล่านี้เรียกว่าเส้นฟรังก์โฮเฟอร์ (Fraunhofer lines) และค่าดัชนีหักเหของแก้วชนิดต่างๆบนเส้นฟรังก์โฮเฟอร์มีค่าดังตารางด้านล่าง

| $\lambda$ (nm) | Characterization | $n$         |             |
|----------------|------------------|-------------|-------------|
|                |                  | Crown glass | Flint glass |
| 486.1          | F, blue          | 1.5286      | 1.7328      |
| 589.2          | D, yellow        | 1.5230      | 1.7205      |
| 656.3          | C, red           | 1.5205      | 1.7076      |

กำหนดให้ดัชนีหักเหของแสงสีน้ำเงินเป็น  $n_F$  ดัชนีหักเหของแสงสีเหลืองเป็น \_\_\_\_\_ ดัชนีหักเหของแสงสีแดงเป็น \_\_\_\_\_

กำลังการกระจาย (dispersive power) ถูกนิยามเป็น

$$\Delta = \frac{n_F - n_C}{n_D - 1}$$

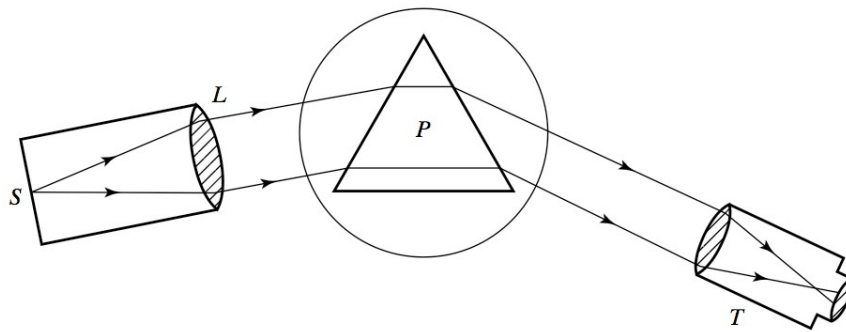
โดยส่วนกลับของกำลังการกระจาย  $1/\Delta$  ถูกเรียกว่า **Abbe number** (เลขแอบบี)

จากตารางดังกล่าวเราหาลำลังการกระจายของแก้วพลินที่ได้เป็น \_\_\_\_\_

และกำลังการกระจายของแก้วคราวน์ได้เป็น \_\_\_\_\_

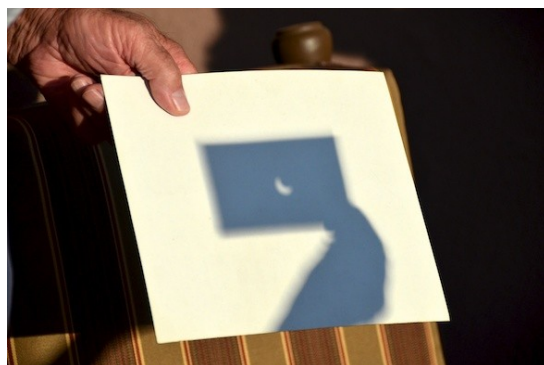
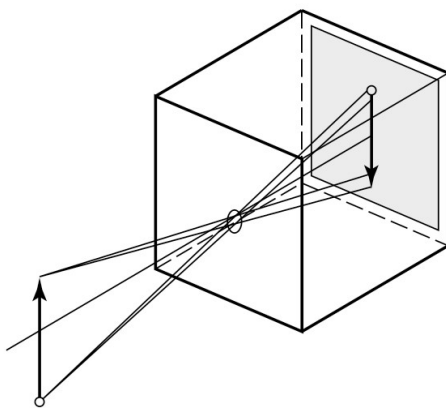
### ปริซึมสเปกโตรมิเตอร์ (Prism spectrometer)

เพราะสมบัติการกระจายแสงของปริซึมทำให้เราสามารถนำปริซึมมาใช้ในการแยกแยะองค์ประกอบของแสงจากแหล่งกำเนิดได้ว่าแสงนั้นมีความยาวคลื่นใดเป็นองค์ประกอบบ้าง ซึ่งมีประโยชน์มากเมื่อต้องการวิเคราะห์สมบัติของสสาร เพราะสมบัติการเปลี่ยนชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนของวัสดุ/สสาร/ธาตุให้แสงที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกัน ทำให้เราศึกษาองค์ประกอบและฟิสิกส์ภายในของวัสดุนั้นๆได้ ส่วนประกอบของปริซึมสเปกโตรมิเตอร์มีดังภาพ



### 4. กล้องถ่ายรูป (Camera)

Camera มีรากศัพท์จากภาษาละตินที่แปลว่าห้อง กล้องชนิดแรกของโลกจึงเป็นเพียงห้องปิดที่มีรูเล็กๆให้แสงเข้ามามาดังภาพ (และพวกเรา รู้จักกล้องชนิดนี้กันในชื่อกล้องรูเข็ม)



เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นมีการซ้อนทับของ \_\_\_\_\_  
 การทำให้รูเปิดมีขนาดเล็กๆเพื่อที่จะทำให้ภาพ \_\_\_\_\_  
 แต่ว่าถ้ารูเปิดมีขนาดเล็กเกินไปก็จะทำให้ภาพ \_\_\_\_\_ เนื่องจากผลของ \_\_\_\_\_  
 สังเกตได้ว่าภาพจากกล้องรูเข็มไม่มีความยาวโฟกัสเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นภาพที่เกิดขึ้นจากวัตถุ ทั้งที่อยู่ใกล้และไกลจะอยู่ในโฟกัสพร้อมๆกัน แต่ข้อเสียของกล้องรูเข็มก็คือปริมาณแสงที่เข้ามาน้อย ดังนั้นถ้าเราใช้ฟิล์มเพื่อรับภาพ ทำให้ต้องเปิดหน้ากล้องเป็นเวลานานๆ เพื่อที่จะได้ภาพที่สมบูรณ์ (และเป็นเหตุผลที่เราต้องปิดด้านอื่นให้สนิทเพื่อที่จะไม่ให้แสงจากด้านอื่นรบกวน)

กล้องถ่ายภาพสมัยใหม่ก็ใช้หลักการเดียวกันกับกล้องรูเข็มโดยนำเลนส์นูนมาแทนที่ช่องเปิดเพื่อที่จะได้ปริมาณแสงที่เพิ่มขึ้นและมีความคมชัดมากขึ้นแต่ข้อเสียคือภาพที่ได้จะมีระยะโฟกัสที่จำกัด จึงต้องมีการปรับระบบเชิงแสงของเราเพื่อที่จะให้วัตถุที่เราสนใจอยู่ในระยะโฟกัส

#### 4.1 กล้องถ่ายรูป

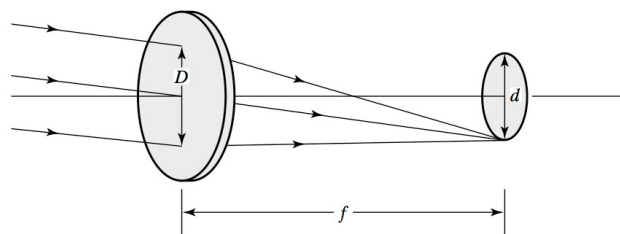
ลองพิจารณากรณีที่วัตถุอยู่ที่ระยะไกลมากๆ จนสามารถประมาณให้แสงจากวัตถุเป็น \_\_\_\_\_ เพื่อที่จะให้ภาพมีความคมชัด ฟิล์มที่ใช้ต้องอยู่ที่ระยะ \_\_\_\_\_  
 ถ้าเราไม่สามารถเลื่อนระยะฟิล์มกับเลนส์นูนได้ เมื่อเลื่อนวัตถุเข้ามาใกล้มากขึ้น จะทำให้ภาพที่เกิดขึ้นอยู่ที่ \_\_\_\_\_ ของแผ่นฟิล์ม

โดยทั่วไปเราจะแก้ไขโดยการขยับตัวเลนส์เข้าออกเพื่อปรับให้ตำแหน่งของภาพตรงกับแผ่นฟิล์ม อย่างไรก็ตามการเคลื่อนเลนส์เพื่อให้ภาพคมชัดก็ยังมีข้อจำกัดซึ่งมาจากขนาดของกล้องเอง ในบางครั้งเราก็ต้องแก้ไขโดยการเปลี่ยนเลนส์ให้เป็นเลนส์ที่มีโฟกัสสั้นลง

ความกว้างของช่องเปิดก็เป็นส่วนสำคัญของกล้องถ่ายรูป ในกล้องทั่วไปนั้นความกว้างของช่องเปิดมักสัมพันธ์กับความเร็วชัตเตอร์เพื่อที่จะควบคุมปริมาณแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์ม กำลังของแสงต่อพื้นที่ที่ตกบนแผ่นฟิล์ม (irradiance - ความรับอาบรังสีมีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร  $W/m^2$ ) ซึ่งขึ้นกับพื้นที่ช่องเปิดและพื้นที่ของภาพดังสมการ

$$E_e \propto \frac{\text{area of aperture}}{\text{area of image}} = \frac{D^2}{d^2}$$

โดยที่  $D$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด และ  $d$  เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางของขนาดภาพ



ในกรณีที่ภาพวัตถุไกลกว่าระยะโฟกัสมากๆ เราจะได้ว่า ขนาดของภาพขึ้นกับกำลังขยายขึ้นกับความยาวโฟกัส

$$m = \frac{-s'}{s} = \frac{f}{s-f} \propto f$$

ดังนั้น

$$E_e \propto \frac{D^2}{f^2}$$

เรานิยามปริมาณ

$$A \equiv \frac{f}{D}$$

ว่าเป็น relative aperture (ขนาดช่องเปิดสัมพัทธ์) โดยที่ในบางครั้งเราเรียกปริมาณนี้ในรูปแบบของ f-number ( $f/A$ ) ตัวอย่างเช่น เลนส์ที่มีความยาวโฟกัส 4 ซม. และมีความกว้างช่องเปิดเท่ากับ 0.5 ซม. จะมีขนาดช่องเปิดสัมพัทธ์เท่ากับ  $A = 4/0.5 = 8$  และเรียกว่าโดยใช้ f-number ว่าช่องเปิดนี้มี  $f/8$  ซึ่งถูกใช้บ่อยในกล้องถ่ายรูป (บางทีก็เรียกว่า focal ratio, f-ratio หรือ f-stop) ซึ่ง irradiance จะแปรผกผันกับขนาดช่องเปิดสัมพัทธ์กำลังสอง

$$E_e \propto \frac{1}{A^2}$$

กล้องส่วนใหญ่มีตัวเลือกของช่องเปิดซึ่งมีค่า relative aperture ที่ทำให้ irradiance ลดลงเป็นขั้นๆ ทีละ 2 เท่าดังตาราง

| $A = f\text{-number}$ | $(A = f\text{-number})^2$ | $E_e$     |
|-----------------------|---------------------------|-----------|
| 1                     | 1                         | $E_0$     |
| 1.4                   | 2                         | $E_0/2$   |
| 2                     | 4                         | $E_0/4$   |
| 2.8                   | 8                         | $E_0/8$   |
| 4                     | 16                        | $E_0/16$  |
| 5.6                   | 32                        | $E_0/32$  |
| 8                     | 64                        | $E_0/64$  |
| 11                    | 128                       | $E_0/128$ |
| 16                    | 256                       | $E_0/256$ |
| 22                    | 512                       | $E_0/512$ |

โดยหลักการเลือกขนาดของช่องเปิดของกล้องมักขึ้นกับความเร็วชัตเตอร์ (เวลาที่เปิดหน้ากล้อง) เพราะว่าการเปิดรับแสงหรือ exposure ( $J/m^2$ ) คือปริมาณของพลังงานแสงที่ตกบนฟิล์ม ดังนั้น exposure ( $J/m^2$ ) มีค่าเท่ากับ irradiance ( $J/m^2/s$ ) คูณกับเวลาที่เปิดชัตเตอร์ (s)

$$\text{exposure} = \text{irradiance} \times \text{time}$$

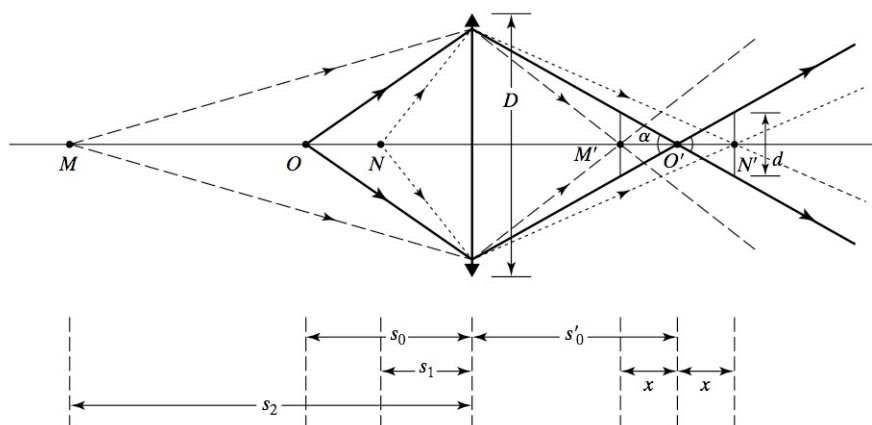
**ตัวอย่าง** ถ้าเดิมมีช่องเปิดซึ่งมี f-number เป็น  $f/2.8$  โดยที่มีความเร็วชัตเตอร์เป็น  $1/50$  s ถ้าเราต้องการเปลี่ยนไปใช้ช่องเปิด  $f/4$  เราต้องปรับความเร็วชัตเตอร์ให้เป็น \_\_\_\_\_ เพื่อให้มีค่าการเปิดรับเท่าเดิม ซึ่งส่งผลให้คุณภาพของภาพมีค่าเท่าเดิม และถ้าเราต้องการเปลี่ยนไปใช้ช่องเปิดที่มีค่าเล็กลงเช่น  $f/2$  เราต้องปรับความเร็วชัตเตอร์ให้เป็น \_\_\_\_\_ เพื่อให้มีค่าการเปิดรับเท่าเดิม และมีคุณภาพของภาพเท่าเดิม

อีกตัวแปรหนึ่งที่นักถ่ายภาพใช้คือ ISO ซึ่งเอาไว้บอกว่าฟิล์มของเรานั้นมีความไวแสงเท่าไร เช่น ISO 200 มีความไวแสงต่ำกว่า ISO 1600 ซึ่งหมายความว่า ที่ความเร็วชัตเตอร์เท่ากัน (เวลาที่เปิดหน้ากล้องเท่ากัน) ISO สูงกว่าจะรับแสงได้สูงกว่า ดังนั้นเมื่อเลือกใช้ ISO สูงจึงไม่จำเป็นต้องเปิดหน้ากล้องนาน หรือในทางกลับกัน ISO สูงๆ จะถูกใช้ในกรณีที่ต้องการ ถ่ายภาพในสภาพแสงน้อย



#### 4.2 ความลึกของสนาม (the depth of field)

การเลือกขนาดช่องเปิดนอกจากส่งผลต่อปริมาณแสงแล้ว (ซึ่งเราสามารถควบคุมได้จากความเร็วชัตเตอร์และเลข ISO) ขนาดของช่องเปิดยังส่งผลต่อความชัดลึกชัดตื้นของโฟกัสอีกด้วย พิจารณาระบบเลนส์นูนเดี่ยวซึ่งมีวัตถุที่จุด M, O, และ N ตามลำดับ



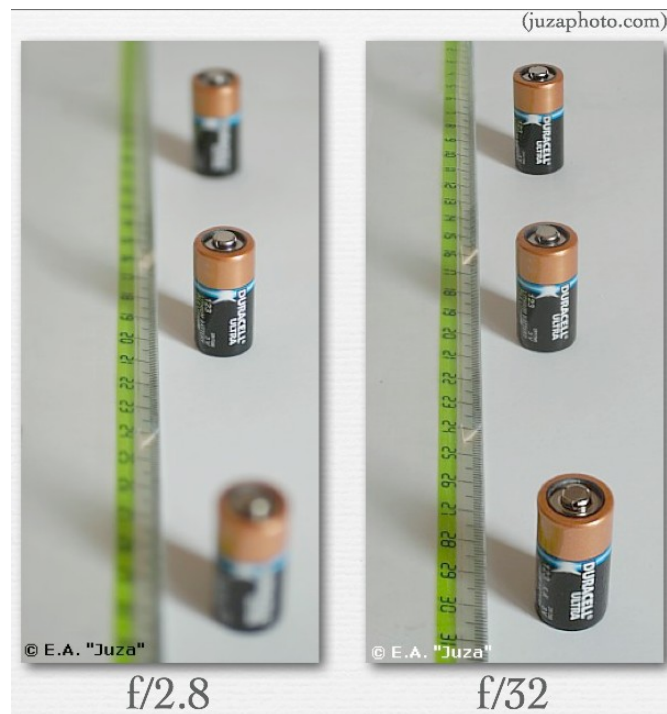
ถ้ากำหนดให้ฟิล์มหรือฉากอยู่ที่จุด  $O'$  เราจะพบว่าวัตถุที่จุด  $O$  จะสร้างภาพที่ \_\_\_\_\_ ในขณะอยู่ที่จุด  $M$  และ  $N$  \_\_\_\_\_

ซึ่งเกิดเป็นวงกลมของความสับสน circle of confusion และมีลักษณะภาพที่ไม่คมชัดเท่าจุด  $O'$  ถ้ากำหนดให้ฟิล์มสามารถแยกแยะได้ว่าแสงสองเส้นที่ห่างกันอย่างน้อยที่สุด  $d$  มาจากคนละที่กัน นั่นคือถ้าแสงห่างกันน้อยกว่าค่า  $d$  แสงสองเส้นนี้จะสร้างภาพซึ่งอยู่ในโฟกัส เราสามารถนิยามความลึกของสนาม (depth of field) ซึ่งคือระยะวัตถุซึ่งสร้างภาพได้ชัดเจนภายใต้ circle of confusion ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $s_2 - s_1$  ได้จาก

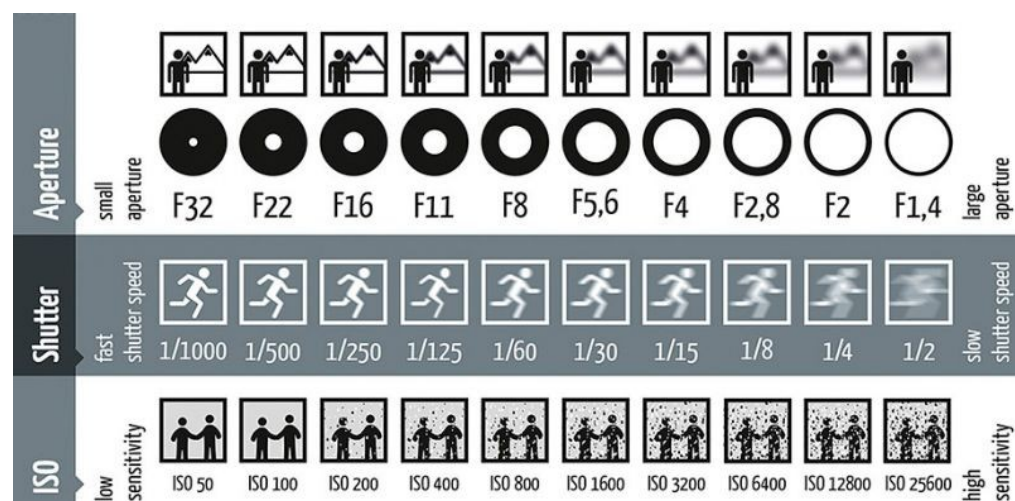
จะได้ว่า

$$depth\ of\ field = s_2 - s_1 = \frac{2Ad s_0(s_0 - f)f^2}{f^4 - A^2 d^2 s_0^2}$$

สังเกตว่าเมื่อค่า relative aperture มีค่ามากขึ้นจะทำให้ความลึกของสนามมีค่ามากขึ้นด้วย



จากหลักการทำงานของกล้องถ่ายรูปทั้งหมดสามารถสรุปเป็นภาพดังนี้



**ตัวอย่าง** เลนส์ความยาวโฟกัส  $+5\text{ cm}$  ซึ่งมีช่องเปิด  $f/16$  ถูกใช้ถ่ายภาพวัตถุที่ห่างออกไป  $2.75\text{ m}$  ถ้าเลือกให้วงกลมของความสับสนมีค่าเท่ากับ  $d = 0.04\text{ mm}$  จงหาตำแหน่งชัดใกล้ ชัดไกล และ ความลึกของสนามในกรณีนี้