

## บทที่ 2

### แสงและทัศนศาสตร์

(Light and optics)

#### 2.1 บทนำ

ในบทเรียนเรื่อง แสงและทัศนศาสตร์ สามารถแบ่งเป็นสองส่วนหลักใหญ่ ๆ คือ การศึกษา การเคลื่อนที่ของแสง โดยใช้แนวคิดเรื่อง รังสีแสงซึ่งเรียกว่า ทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิต ซึ่งแนวคิดนี้สามารถนำไปใช้อธิบายคุณสมบัติการสะท้อน และการหักเหของแสงได้ ส่วนที่สองเป็นการศึกษาที่เรียกว่า ทัศนศาสตร์เชิงกายภาพ วิธีนี้สามารถใช้อธิบายการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงได้ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่ซับซ้อนมากขึ้นได้อีกด้วย เช่น โพลาริเซชันของแสง เป็นต้น สำหรับการที่แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นคลื่นตามขวางทำให้มีสมบัติทั้งการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน การแทรกสอด เช่นเดียวกับคลื่นตามขวาง แต่จุดเด่นของสมบัติของแสงคือ นำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวางทางด้านทัศนศาสตร์ เช่น การสร้างกล้องจุลทรรศน์ กล้องดาราศาสตร์ เป็นต้น ซึ่งในบทเรียนจะกล่าวถึงการเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสงด้วย ทั้งนี้ในส่วนแรกจะกล่าวถึงธรรมชาติของแสงที่มนุษย์มองเห็นจากสมบัติการสะท้อนของแสง โดยจะกล่าวถึงการสะท้อนของแสงบนกระจก การเกิดภาพจากเลนส์ การหักเหของแสงผ่านเลนส์ การแทรกสอดของแสง รวมทั้งการเลี้ยวเบนของแสงด้วย เพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจสมบัติต่าง ๆ ของแสงอย่างละเอียด การประยุกต์ใช้แสงในการสร้างอุปกรณ์ต่าง ๆ ในชีวิตประจำวัน การมองเห็นของดวงตามนุษย์ และปรากฏการณ์ของแสงในชีวิตประจำวัน ซึ่งครุวิทยาศาสตร์จำเป็นต้องเข้าใจเพื่อนำไปสู่การพัฒนาการสอนของตนเองได้ต่อไป

#### 2.2 ธรรมชาติของแสง (Nature of light)

การที่มนุษย์มองเห็นสิ่งต่าง ๆ ได้ เป็นเพราะสิ่งนั้นสะท้อนแสงเข้าสู่ตานัยน์ตาเรา เซอร์ไอแซค นิวตัน (Sir Isac Newton) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายเกี่ยวกับแสงและการมองเห็นว่า แสงเป็นอนุภาค ที่ส่งออกมาจากแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงออกไปจากแหล่งกำเนิดแสง

ซึ่งแสงจะสามารถทะลุผ่านวัตถุโปร่งใส และสะท้อนกลับจากผิววัตถุทึบแสง เมื่ออนุภาคเหล่านี้กระทบหรือสะท้อนเข้าสู่ชั้นตาจะทำให้เกิดการมองเห็นขึ้น

ต่อมาฮอยเกนส์ (Christiaan Huygens) ได้เสนอแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นและตั้งทฤษฎีคลื่นแสงขึ้น ทฤษฎีนี้อธิบายกฎการสะท้อนและกฎการหักเหของแสงได้ แต่ยังไม่เป็นที่ยอมรับในขณะนั้น ภายหลัง โทมัส ยัง (Thomas Young) และเฟรสเนล (Augustin Jean Fresnel) ได้ทดลองพบการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง การทดลองของยังเกี่ยวกับการแทรกสอดของแสงสามารถวัดความยาวคลื่นของแสงได้ ซึ่งอธิบายได้ด้วยทฤษฎีคลื่นแสง ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันจนถึงปัจจุบัน การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสงช่วยให้วัดอัตราเร็วของแสงได้ โดยไมเคิลสัน (Albert Michaelson) และมอร์เลย์ (Edward Morley) ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ไมเคิลสัน อินเตอร์เฟอโรมิเตอร์ (Michaelson interferometer) ทดลองวัดอัตราเร็วของแสง ซึ่งได้ผลใกล้เคียงกับค่าที่ยอมรับในปัจจุบัน คือประมาณ  $3 \times 10^8$  m/s ในสุญญากาศต่อมาในปี พ.ศ.2416 เจมส์ คลาก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell) เสนอทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมา ผลจากการคำนวณพบว่าอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับอัตราเร็วของแสง จึงเป็นการสนับสนุนว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง แต่ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ใช้อธิบายปรากฏการณ์บางอย่างของแสง เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกไม่ได้

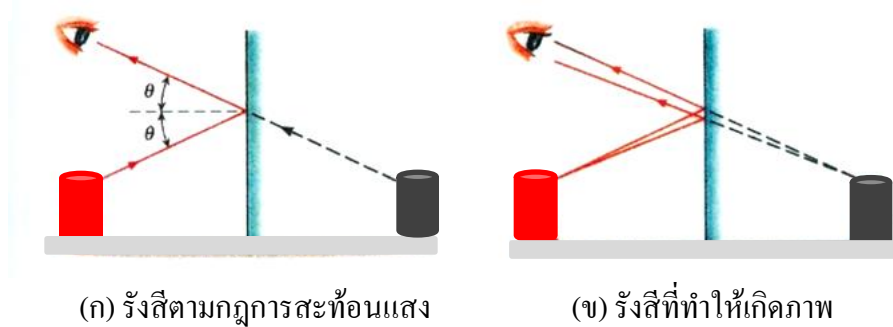
ต่อมาในปี พ.ศ.2448 ไอน์สไตน์ (Albert Einstein) ได้ตั้งทฤษฎีขึ้นมาอธิบายว่าแสงเป็นก้อนพลังงานที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) และพลังงานของโฟตอนจะขึ้นกับความถี่ ถ้าความถี่ของโฟตอนสูงพอ ทันทีที่แสงตกกระทบผิวโลหะโฟตอนของแสงจะถ่ายทอดพลังงานให้อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมของโลหะนั้นได้ การพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นหรือเป็นโฟตอนขึ้นอยู่กับปรากฏการณ์ของแสงที่ต้องการอธิบาย เช่น การอธิบายการสะท้อนและการหักเหของแสงต้องพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นและใช้ทฤษฎีคลื่นของแสงอธิบาย แต่การอธิบายปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกต้องพิจารณาให้แสงเป็นโฟตอนจึงจะอธิบายได้ถูกต้องสมบูรณ์ ในปัจจุบันเป็นที่ยอมรับกันว่า แสงมีสมบัติคู่ (Dual properties) คือ แสงเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาคในเวลาเดียวกัน แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะปรากฏการณ์ที่อธิบายได้โดยแนวคิดที่ว่าแสงเป็นคลื่นเท่านั้น

## 2.3 การสะท้อนของแสง (Reflection)

### 2.3.1 กระจกเงาระนาบ (Mirror)

เมื่อมีวัตถุอยู่หน้ากระจกเงาระนาบจะมีรังสีของแสงกระจายออกจากวัตถุไปตกที่ผิวกระจกด้วยมุมตกกระทบที่มีค่าต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมาก จึงมีรังสีสะท้อนออกจากผิวกระจกในทิศทางทำ

มุมสะท้อนต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน และเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง พิจารณารังสีที่มีทิศทางมุมตกที่ผิวกระจกเป็นมุมตก  $\theta$  แล้วสะท้อนทำมุม  $\theta$  กับผิวกระจกเข้าสู่ตา รังสีที่เข้าสู่ตาเป็นแสงจริง โดยผู้สังเกตจะมีความรู้สึกที่แสงจริงนี้มีทิศทางมาจากเบื้องหลังกระจกดังภาพที่ 2.1 (ก) ที่แสดงด้วยเส้นประจะเรียกว่า แสงเสมือน ถ้าพิจารณารังสีสองรังสีที่ออกจากจุดหนึ่งของวัตถุไปตกบนผิวกระจกคนละจุด ดังภาพที่ 2.1 (ข) ก็จะมีรังสีสะท้อนสองรังสีเข้าสู่ตา เมื่อต่อแนวรังสีสะท้อนทั้งสองรังสีไปทางเบื้องหลังกระจกรังสีที่ต่อออกไปนี้เป็นแสงเสมือนที่จะไปตัดกันที่จุด ๆ หนึ่งเบื้องหลังกระจก และจะเกิดภาพของจุดบนวัตถุขึ้นที่จุดตัดนี้ ในทำนองเดียวกันรังสีอื่น ๆ จากจุดเดียวกันของวัตถุเมื่อไปตกบนกระจกก็จะมีแสงเสมือนของมันไปตัดกันที่จุดเกิดภาพหลังกระจกจุดเดียวกันนี้เช่นกันทุกรังสี ภาพที่เกิดขึ้นเบื้องหลังกระจกนี้ เรียกว่า ภาพเสมือน (Virtual image) เพราะเกิดจากแสงเสมือนไปตัดกันทำให้เกิดภาพเสมือนที่จุดตัดนี้

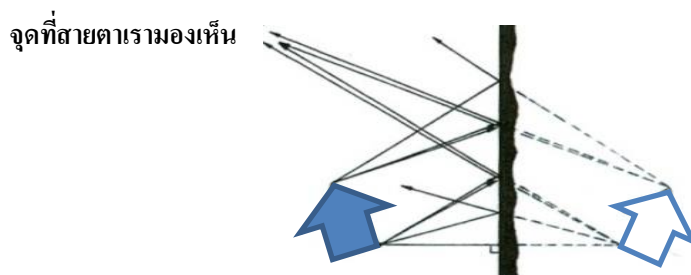


(ก) รังสีตามกฎการสะท้อนแสง

(ข) รังสีที่ทำให้เกิดภาพ

ภาพที่ 2.1 ทางเดินของรังสีที่ทำให้เกิดภาพเสมือนหลังกระจกเงาระนาบ

สำหรับจุดอื่น ๆ ของวัตถุก็จะมีรังสีจำนวนมากออกจากจุดนั้นไปตกบนผิวกระจก ทำให้เกิดภาพเสมือนของจุดนั้นหลังกระจก จุดภาพเหล่านั้นจะเรียงต่อกันไปจนกลายเป็นภาพเสมือนของวัตถุอยู่หลังกระจก และเนื่องจากลักษณะการเกิดภาพของแต่ละจุดของวัตถุจะเป็นไปในลักษณะที่คล้ายกันทุกจุด ดังนั้นการเขียนเส้นแสดงทางเดินของรังสีที่ออกไปจากจุดใดจุดหนึ่งบนวัตถุเพียงสองรังสีไปสะท้อนที่กระจกจนเกิดรังสีเสมือนไปตัดกันเกิดภาพเสมือนของจุดนั้น ๆ หลังกระจก ก็จะสามารถหาดำแหน่งภาพของจุดอื่น ๆ บนวัตถุได้



ภาพที่ 2.2 ทางเดินของรังสีที่ทำให้เกิดภาพเสมือนหลังกระจกเงาระนาบ

สำหรับภาพที่ 2.2 รังสีตกจากจุดบนและจุดล่างของวัตถุไปตกที่ผิวกระจกเงาราบแล้วสะท้อนออกไปจากกระจก โดยรังสีสะท้อนที่ออกมาจากจุดเดียวกันบนวัตถุจะเป็นรังสีที่ปล่อยออกจากกันไม่สามารถไปตัดกันได้จริง ดังนั้นการหาจุดตัดกันของรังสีสะท้อนต้องต่อแนวรังสีสะท้อนย้อนกลับที่เสมือนว่าไปตัดกันหลังกระจก และเกิดภาพเสมือนที่จุดตัดหลังกระจกนี้ โดยรังสีสะท้อนที่มาจากจุดด้านบนของวัตถุจะเสมือนว่าไปตัดกันเกิดภาพด้านบนของวัตถุขึ้นหลังกระจก รังสีสะท้อนนี้เมื่อเข้าสู่ตาผู้สังเกตก็จะทำให้ตามองเห็นภาพของจุดด้านบนวัตถุในกระจก ในทำนองเดียวกันรังสีที่สะท้อนมาจากจุดด้านล่างของวัตถุจะเสมือนว่าไปตัดกันเกิดภาพที่จุดด้านล่างของวัตถุขึ้นที่หลังกระจก เมื่อรังสีสะท้อนนี้เข้าสู่ตาผู้สังเกตก็จะทำให้ตามองเห็นภาพจุดด้านล่างของวัตถุในกระจก และเห็นว่าภาพจุดด้านล่างของวัตถุจะอยู่ด้านซ้ายขณะที่จุดด้านล่างของวัตถุที่เป็นจุดทำให้เกิดภาพนี้เป็นจุดด้านล่างขวาของวัตถุ ส่วนจุดอื่นบนวัตถุก็จะเกิดภาพในทำนองเดียวกันกับภาพที่ 2.3 ภาพมือหน้ากระจกเงาระนาบจะเกิดภาพเสมือนในกระจกมีลักษณะกลับทิสซ้ายขวาอยู่ในกระจก

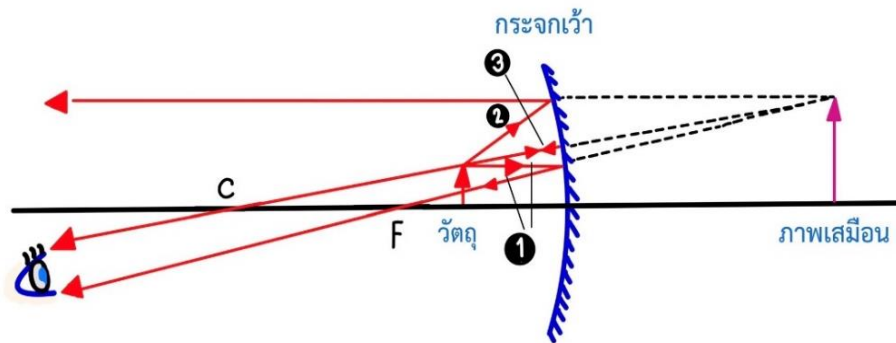


ภาพที่ 2.3 ลักษณะภาพหลังกระจกเงาระนาบที่กลับทิสซ้ายขวากับวัตถุ

### 2.3.2 กระจกเว้า (Concave mirror)

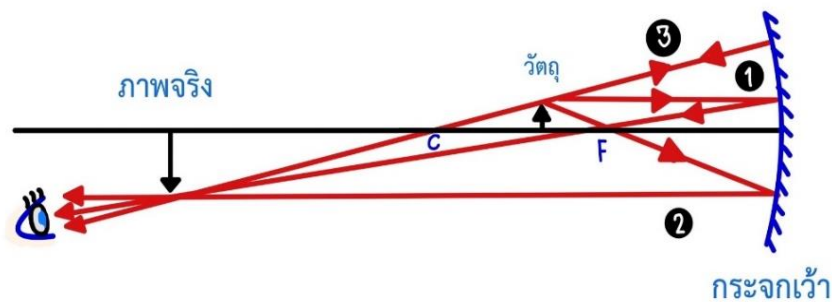
ภาพที่เกิดจากกระจกเว้าจะเกิดได้ 3 ลักษณะตามตำแหน่งของวัตถุที่อยู่หน้ากระจก

1. เมื่อวัตถุอยู่ระหว่างกระจกกับจุดโฟกัสดังภาพที่ 2.4 จะได้ภาพเสมือนหัวตั้งขนาดขยาย จึงนิยมใช้ทำกระจกส่องหน้า ถ้าวัตถุอยู่ชิดกระจกให้ขนาดภาพเท่ากับขนาดวัตถุ เมื่อวางวัตถุไว้ที่ตำแหน่ง c จะเกิดภาพที่ระยะอนันต์ เส้นหมายเลข ❶ เป็นรังสีตกที่ขนานกับแกนमुखสำคัญแล้วสะท้อนผ่านจุดโฟกัส เส้นหมายเลข ❷ เป็นรังสีตกที่มีแนวผ่านจุดโฟกัสแล้วสะท้อนขนานกับแกนमुखสำคัญ เส้นหมายเลข ❸ เป็นรังสีตกที่มีแนวผ่านจุดศูนย์กลางความโค้งแล้วสะท้อนกลับสวนทิสกับรังสีตก แนวรังสีสะท้อนทั้งสามเสมือนว่าไปตัดกันจนเกิดภาพเสมือนหลังกระจก



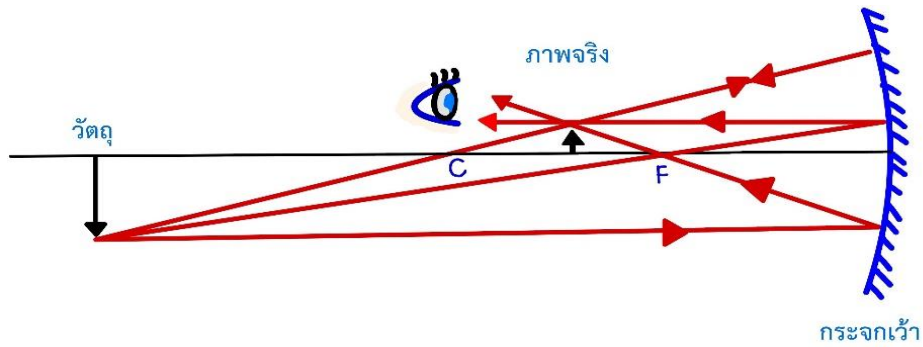
ภาพที่ 2.4 วัตถุอยู่ระหว่างกระจกเว้ากับจุดโฟกัสของกระจก

2. เมื่อวัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัสกับจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจก ภาพที่ 2.5 จะได้ภาพจริงหัวกลับขนาดขยายอยู่หน้ากระจก ถ้าวัตถุอยู่ที่จุดศูนย์กลางความโค้งขนาดภาพจะเท่ากับขนาดวัตถุ การเขียนเส้นแสดงทางเดินของรังสีตกและรังสีสะท้อนเพื่อหาดำแหน่งเกิดภาพจะเหมือนกันกับข้อ 1 แต่รังสีสะท้อนจะไปตัดกันจริงหน้ากระจก



ภาพที่ 2.5 วัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัสกับจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกเว้า

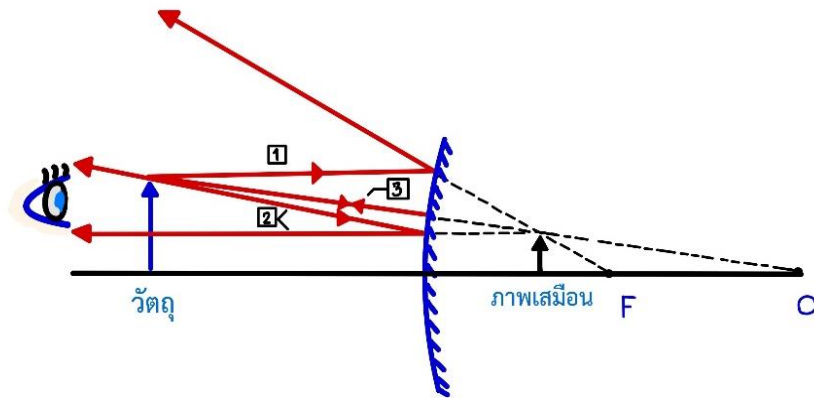
3. เมื่อวัตถุอยู่ไกลออกไปจากจุดศูนย์กลางความโค้งของกระจกจะเกิดภาพจริงหัวกลับขนาดย่ออยู่หน้ากระจกดังภาพที่ 2.6 และถ้าวัตถุอยู่ที่ระยะอนันต์จะเกิดภาพจริงขนาดเล็กมากที่จุดโฟกัสของกระจก จึงใช้กระจกเว้าเป็นกระจกใกล้วัตถุ (Objective mirror) หรือกระจกปฐมภูมิ (Primary mirror) ของกล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง (Refracting telescope) หรือกล้องโทรทรรศน์ชนิดผสม (Catadioptric telescope) เพื่อสร้างภาพของดวงดาวหรือวัตถุอื่นในท้องฟ้า ขึ้นที่จุดโฟกัสของกระจก แล้วใช้เลนส์ใกล้ตา (Eyepiece lens) ขยายภาพที่จุดโฟกัสให้มีขนาดใหญ่มากขึ้น



ภาพที่ 2.6 ภาพที่เกิดจากวัตถุที่อยู่ระหว่างจุดศูนย์กลางของความโค้ง

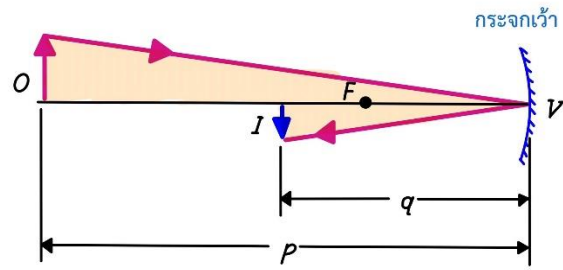
2.3.3 กระจกนูน (Convex mirror)

เมื่อวัตถุอยู่หน้ากระจกนูน การเขียนแนวรังสีตกทั้งสามกรณีเช่นเดียวกับกระจกเว้า จะได้แนวรังสีสะท้อนเสมือนว่าไปตัดกัน เกิดภาพเสมือนหัวตั้งขนาดย่อข้างหลังกระจก ถ้าวัตถุอยู่ชิดกระจกจะได้ภาพเสมือนขนาดเท่าวัตถุอยู่ชิดกระจกเช่นกัน และถ้าวัตถุอยู่ระยะอนันต์จากกระจกจะได้ภาพเสมือนเป็นจุดอยู่ที่จุดโฟกัสของกระจก จะเห็นได้ว่าภาพที่เกิดจากกระจกนูนจะเป็นภาพเสมือนหลังกระจกได้กรณีเดียวเท่านั้น และสามารถเลือกเขียนแนวรังสีตกเพียงสองแนวก็เพียงพอที่จะหาตำแหน่งเกิดภาพได้เช่นเดียวกับกระจกเว้า การเกิดภาพของกระจกนูนเป็นไปตามภาพที่ 2.7

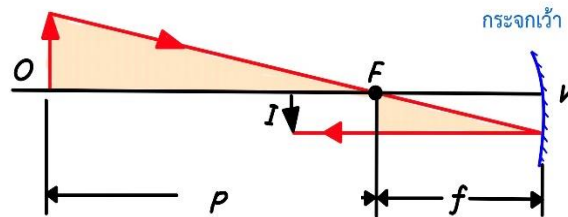


ภาพที่ 2.7 ภาพที่เกิดจากวัตถุอยู่หน้ากระจกนูน

ความสัมพันธ์ของความยาวโฟกัส ระยะวัตถุ และระยะภาพของกระจกโค้ง ถ้าวัตถุ O อยู่ห่างจากกระจกเว้ามากกว่ารัศมีความโค้งของกระจกจะทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับ I ดังภาพที่ 2.7 เมื่อสร้างสามเหลี่ยมคล้ายสองคู่โดยมีขนาดวัตถุ O และภาพ I เป็นฐานของสามเหลี่ยม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.8 สามเหลี่ยมคล้ายที่แรงาเกิดจากวัตถุและภาพของกระจกเว้า

จากสามเหลี่ยมคล้ายในภาพที่ 2.8 (ข) จะได้

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} \quad (2-1)$$

สำหรับกำลังขยายภาพ  $m$  หมายถึง อัตราส่วนระหว่างขนาดภาพต่อขนาดวัตถุหรือระยะภาพต่อระยะวัตถุ ดังนั้น

$$m = \frac{I}{O} = \frac{q}{p} \quad (2-2)$$

เมื่อ	$f$	แทน ความยาวโฟกัสของกระจก
	$p$	แทน ระยะวัตถุ
	$q$	แทน ระยะภาพ
	$O$	แทน ขนาดวัตถุ
	$I$	แทน ขนาดภาพ
	$m$	แทน กำลังขยายภาพ

โดยกำหนดให้ขนาดของภาพเสมือนหรือระยะภาพเสมือนมีเครื่องหมายเป็นลบ ขนาดภาพจริงหรือระยะภาพจริงมีเครื่องหมายเป็นบวก ดังนั้นถ้ากำลังขยายภาพ  $m$  มีเครื่องหมายลบ แสดงว่าเกิดภาพเสมือนหัวตั้ง ถ้า  $m$  มีเครื่องหมายบวกแสดงว่าเกิดภาพจริงหัวกลับ ถ้า  $m$  มากกว่า 1 จะเป็นภาพขนาดขยาย ถ้า  $m$  เท่ากับ 1 ขนาดภาพเท่ากับขนาดวัตถุ และถ้า  $m$  น้อยกว่า 1 จะเป็นภาพขนาดย่อ

ตัวอย่างที่ 2.1 วัตถุสูง 10 เซนติเมตร อยู่หน้ากระจกนูน รัศมีความโค้ง 20 เซนติเมตร เกิดภาพห่างจากกระจก 2 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งวัตถุ กำลังขยายภาพและขนาดภาพ

วิธีทำ ให้ ตำแหน่ง  $O = 10$  เซนติเมตร  
ตำแหน่ง  $R = -20$  เซนติเมตร

หรือ ความยาวโฟกัส  $f = \frac{-R}{2} = \frac{-20 \text{ cm}}{2}$   
 $= -10$  เซนติเมตร

และ  $q = -2$  เซนติเมตร

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

$$\frac{1}{-10 \text{ cm}} = \frac{1}{p} - \frac{1}{2 \text{ cm}}$$

จะได้  $p = 2.5$  เซนติเมตร

ตำแหน่งวัตถุ 2.5 เซนติเมตร

จาก  $m = \frac{q}{p} = -\frac{2 \text{ cm}}{2.5 \text{ cm}} = -0.8$

กำลังขยายภาพลดลง 0.8 เท่า

และ  $m = \frac{I}{O}$   
 $-0.8 = \frac{I}{10}$   
 $I = -8$  เซนติเมตร

**คำตอบ** ดังนั้นจะได้ว่า ขนาดภาพลดลง 8 เซนติเมตร

ตัวอย่างที่ 2.2 ใช้กระจกเว้าความยาวโฟกัส 0.75 เซนติเมตร ต่อดูพื้นผิหนึ่งเห็นภาพพื้นในกระจกห่างจากกระจก 1.5 เซนติเมตร จงหาระยะห่างจากพื้นผิหนึ่งถึงกระจกและกำลังขยายภาพ

วิธีทำ ให้  $f = 0.75$  เซนติเมตร  
 $q = -1.5$  เซนติเมตร

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

$$\frac{1}{0.75 \text{ cm}} = \frac{1}{p} - \frac{1}{1.5 \text{ cm}}$$

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{0.75 \text{ cm}} + \frac{1}{1.5 \text{ cm}} = \frac{3}{1.5}$$

จะได้  $p = 0.5$  เซนติเมตร

ระยะห่างจากพื้นถึงกระจก 0.5 เซนติเมตร

จาก  $m = \frac{q}{p} = -\frac{1.5 \text{ cm}}{0.5 \text{ cm}} = -3$

**คำตอบ** ดังนั้นจะได้กำลังขยายภาพลดลง 3 เท่า

## 2.4 ภาพที่เกิดจากการหักเหของแสง

เลนส์ (Lens) เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่อาศัยการหักเหของแสงในการเปลี่ยนเส้นทางของแสงทำให้เกิดภาพชนิดต่าง ๆ เลนส์แบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ คือ เลนส์นูน (Convex lens) และเลนส์เว้า (Concave lens) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 นิยามของคำต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณภาพจากกระจก เช่น ระยะวัตถุ ระยะภาพ ความยาวโฟกัส รัศมีความโค้ง เป็นต้น ยังคงใช้ได้กับการคำนวณเรื่องเลนส์เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพราะเลนส์มีหน้าที่ในการรวมแสง (กระจายแสง) เช่นเดียวกับกระจกเว้า (กระจกนูน) จุดที่แตกต่างกันระหว่างเลนส์กับกระจกในกรณีของเลนส์ แสงจะหักเหผ่านเลนส์ไปยังด้านตรงข้ามกับด้านที่วัตถุอยู่ ส่วนกรณีของกระจก แสงที่ตกกระทบกับกระจกจะสะท้อนกลับไปยังด้านที่วัตถุอยู่เท่านั้น



เลนส์นูนสองหน้า เลนส์นูนแกมระนาบ เลนส์นูนแกมเว้า



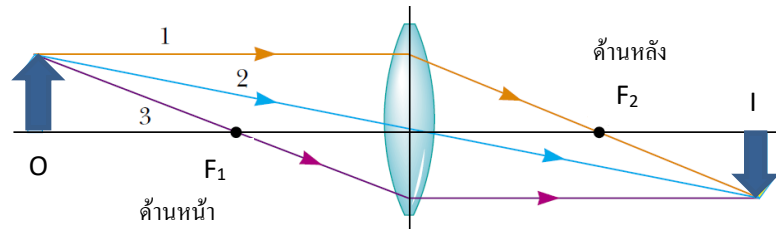
เลนส์นูนเว้าสองหน้า เลนส์เว้าแกมระนาบ เลนส์เว้าแกมนูน

ภาพที่ 2.9 เลนส์นูนและเลนส์เว้า

โดยจะถือว่าเลนส์ที่กำลังจะพิจารณาทั้งหมดเป็นเลนส์บาง (Thin lens) ทำให้การวิเคราะห์ภาพที่เกิดจากเลนส์มีความง่ายขึ้น ดังต่อไปนี้

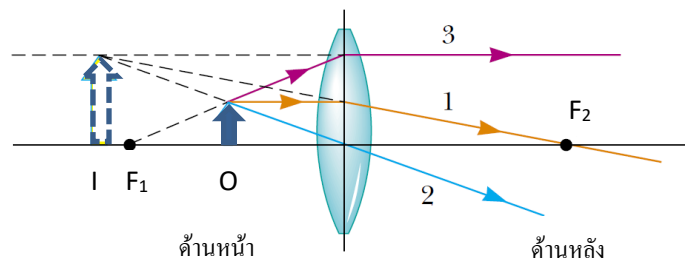
### 2.4.1 เลนส์นูน (Convex lens)

การหาตำแหน่งของภาพที่เกิดจากเลนส์นูนจะเป็นไปในลักษณะเดียวกับการพิจารณากระจกโค้ง โดยพิจารณารังสีแสงที่สะดวกต่อการวิเคราะห์ ภาพที่ 2.10 แสดงรังสีแสงที่สามารถเข้าใจได้ง่ายสามเส้น โดยรังสีแสงหมายเลข 1 เป็นรังสีที่เดินทางตกกระทบกับเลนส์ในทิศทางขนานกับแกนหลัก กรณีนี้แสงที่หักเหผ่านเลนส์จะเดินทางผ่านจุดโฟกัสที่อยู่อีกด้านหนึ่งของเลนส์ ( $F_2$ ) ในทำนองเดียวกัน รังสีแสงหมายเลข 3 ที่เดินทางผ่านจุดโฟกัสด้านหน้าเลนส์ ( $F_1$ ) แสงที่หักเหออกจากเลนส์เดินทางขนานกันแกนหลัก



ภาพที่ 2.10 การวาดเส้นรังสีเพื่อหาตำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์นูน

สำหรับรังสีแสงหมายเลข 2 ที่เดินทางผ่านใจกลางเลนส์ ซึ่งที่จุดนี้ระนาบของเลนส์มีทิศตั้งฉากกับแกนหลัก นั่นคือแสงที่เดินทางออกมาจากเลนส์จะอยู่ในแนวเดิม เพราะฉะนั้นรังสีแสงที่ผ่านใจกลางเลนส์จึงมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังภาพ จุดที่รังสีแสงทั้ง 3 ตัดกันจะเป็นตำแหน่งของภาพที่เกิดขึ้น ในกรณีของภาพที่ 2.11 ภาพที่ได้จึงเป็นภาพจริง (รังสีแสงตัดกันจริง) อยู่ที่ด้านหลังของเลนส์ และสามารถรับภาพด้วยฉากได้

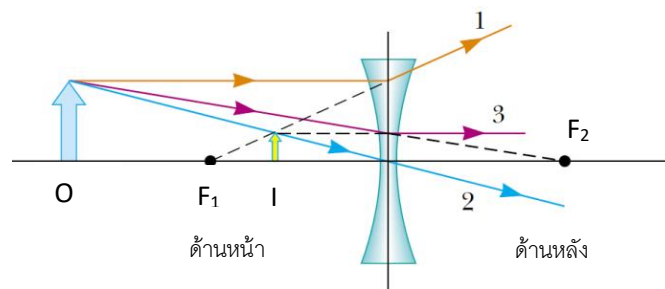


ภาพที่ 2.11 เส้นรังสีเพื่อหาตำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์นูนเมื่อวัตถุอยู่ภายในระยะความยาวโฟกัสของเลนส์

หากพิจารณากรณีเมื่อวัตถุอยู่ห่างจากเลนส์โดยมีระยะวัตถุน้อยกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ จะเห็นได้ว่ารังสีของแสงไม่ตัดกันจริง แต่สามารถลากให้มาตัดกันได้ทางด้านหน้าเลนส์ เพราะฉะนั้นภาพที่ได้ในกรณีนี้เป็นภาพเสมือนอยู่ด้านหน้าเลนส์

#### 2.4.2 เลนส์เว้า (Concave lens)

การวิเคราะห์ภาพที่เกิดจากเลนส์เว้าสามารถทำได้ในทำนองเดียวกัน ภาพที่ 2.12 เป็นแผนภาพการใช้รังสีแสงเพื่อหาดำแหน่งภาพที่เกิดจากเลนส์เว้า เนื่องจากรังสีแสงไม่ตัดกันจริง ภาพที่ได้ในกรณีนี้จะเป็ภาพเสมือน (หัวตั้ง) อยู่ด้านหน้าเลนส์ ถ้าทดลองหาดำแหน่งของภาพของวัตถุที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เกิดจากเลนส์เว้าจะพบว่าภาพที่ได้จะเป็นภาพเสมือนเสมอเพราะเลนส์เว้าทำหน้าที่กระจายแสงเพราะฉะนั้นแสงที่ผ่านเลนส์เว้าไปยังอีกด้านหนึ่งย่อมไม่สามารถที่จะมาตัดกันได้จริง



ภาพที่ 2.12 การวาดเส้นรังสีเพื่อหาดำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์เว้า

ในการวาดเส้นรังสีเพื่อหาดำแหน่งและชนิดของภาพจากเลนส์เว้าและเลนส์นูนนั้นจะไม่สะดวก โดยเฉพาะถ้าต้องการค่าที่แน่นอน สามารถทำได้โดยใช้สมการของเลนส์บาง ซึ่งเป็นสมการเดียวกันกับสมการกระจก (2-1) และ (2-2)

โดยในการใช้สมการนี้ ความยาวโฟกัส( $f$ ) จะเป็นบวกสำหรับเลนส์นูนและเป็นลบสำหรับเลนส์เว้า ระยะวัตถุ( $p$ )เป็นบวกเมื่อวัตถุอยู่หน้าเลนส์และเป็นลบเมื่อวัตถุอยู่หลังเลนส์ ระยะภาพ( $q$ )เป็นบวกเมื่อภาพที่ได้อยู่หลังเลนส์ (หรือเป็นภาพจริง) และเป็นลบเมื่อภาพที่ได้อยู่หน้าเลนส์ (หรือเป็นภาพเสมือน) ส่วนกำลังขยายก็สามารถได้จากสมการ (2-2) เช่นเดียวกับในกรณีของกระจก

ตัวอย่างที่ 2.3 วัตถุมีความสูง 2 เซนติเมตร วางที่ตำแหน่ง 24 เซนติเมตร ห่างจากเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 8 เซนติเมตร จงหา

- ก) ตำแหน่งและชนิดของภาพ
- ข) ความสูงของภาพ

วิธีทำ

$$\begin{aligned} \text{ก) } \frac{1}{q} &= \frac{1}{f} - \frac{1}{p} = \frac{1}{8 \text{ cm}} - \frac{1}{24 \text{ cm}} \\ &= \frac{1}{12} \text{ cm} \\ q &= 12 \text{ cm} \end{aligned}$$

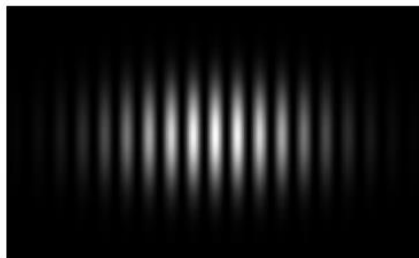
**คำตอบ** ดังนั้นภาพเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 12 เซนติเมตรจากเลนส์เป็นภาพจริง

$$\begin{aligned} \text{ข) } \frac{I}{O} &= \frac{q}{p} = \frac{12 \text{ cm}}{24 \text{ cm}} \\ O &= 1 \text{ cm} \end{aligned}$$

**คำตอบ** ดังนั้นความสูงของภาพ 1 เซนติเมตร

## 2.5 การแทรกสอดของแสง (Interference)

เมื่อแสงสีเดียว (Monochromatic light) ตกกระทบสลิตคู่ (หรือช่องแคบคู่) ที่ความกว้างของช่องแต่ละช่องและระยะห่างระหว่างช่องมีค่าใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง ช่องแคบแต่ละช่องจะทำหน้าที่เหมือนเป็นจุดกำเนิดคลื่นให้คลื่น 2 ขบวน ที่มีความยาวคลื่นและแอมพลิจูดเท่ากันเคลื่อนไปรวมกันหรือเกิดการแทรกสอดกันบนฉาก เกิดเป็นริ้วมืด-สว่างสลับกันบนฉาก ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 ริ้วการแทรกสอดจากสลิตคู่ของแสงที่มีความยาวคลื่นค่าเดียว

ถ้ารู้ระยะห่างระหว่างช่องแคบบนสลิตคู่ ( $d$ ) ระยะจากสลิตคู่ถึงฉาก ( $D$ ) และระยะห่างจากริ้วสว่างกลาง ( $x$ ) ของริ้วสว่างที่  $n$  จะคำนวณหาความยาวคลื่นของแสง ( $\lambda$ ) ได้จาก

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

เนื่องจากระยะ  $d$  และระยะ  $x$  มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะระหว่างฉากกับช่องเล็กยาว  $D$  ดังนั้น  $\theta$  จะเป็นมุมที่เล็กมาก

$$\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{x}{D}$$

$$d\left(\frac{x}{D}\right) = n\lambda$$

ดังนั้นจะหาความยาวคลื่นของแสงได้จากสมการ

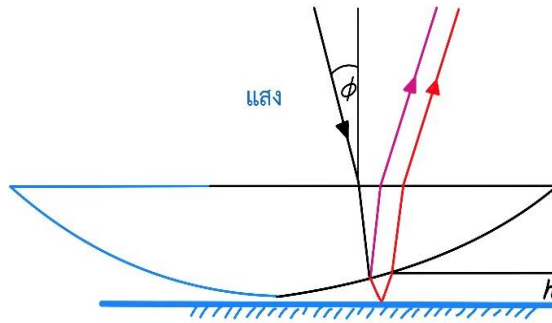
$$\lambda = \frac{dx}{nD} \quad (2-3)$$

**ตัวอย่างที่ 2.4** เมื่อแสงความยาวคลื่นค่าหนึ่งตกกระทบบนสลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่องแคบเท่ากับ  $0.2 \text{ mm}$  และอยู่ห่างจากฉาก  $1 \text{ m}$  ถ้าริ้วสว่างที่ 4 ของริ้วการแทรกสอดของแสงบนฉากอยู่ห่างจากริ้วสว่างกลาง  $9.76 \text{ mm}$  จงหาความยาวคลื่นของแสง

วิธีทำ	จาก	$\lambda = \frac{dx}{nD}$
	จะได้	$\lambda = \frac{(0.200)(9.76)}{(4)(1,000)} \text{ mm}$
		$= 4.88 \times 10^{-4} \text{ mm}$
		$= 488 \times 10^{-9} \text{ m}$

**คำตอบ** ดังนั้นความยาวคลื่นของแสงจึงมีค่าเป็น  $488 \text{ นาโนเมตร}$

เมื่อแสงส่องกระทบบนฟิล์มบาง เช่น ฟองสบู่ หรือฝ้าน้ำมันบนผิวน้ำ แสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับจากผิวนบนของฟิล์มบาง แสงอีกส่วนหนึ่งจะหักเหผ่านผิวนบนของฟิล์มบางไปตกกระทบบนและสะท้อนกลับที่ผิวล่างของฟิล์มบางแล้วหักเหผ่านผิวนบนของฟิล์มบางออกไป แสงทั้งสองส่วนนี้จะแทรกสอดกันเกิดเป็นริ้วการแทรกสอดขึ้นบนฟิล์มบาง ถ้าแสงที่กระทบบนฟิล์มบางเป็นแสงขาวซึ่งมีองค์ประกอบหลายสี ความยาวคลื่นหลายค่า จะทำให้ริ้วการแทรกสอดมีสีสลับสวยงามเหมือนเกิดรุ้งขึ้นบนฟิล์มบาง เมื่อนำเลนส์นูนมาวางบนแผ่นแก้วผิวนบนจะเกิดฟิล์มบางของอากาศที่มีความหนาไม่เท่ากันระหว่างผิวเลนส์และแผ่นแก้ว แต่ฟิล์มบางของอากาศนี้มีสมมาตรรอบจุดสัมผัสของผิวเลนส์กับแผ่นแก้ว เมื่อส่องแสงความยาวคลื่นค่าเดียวลงไป แสงที่สะท้อนกลับที่ผิวล่างของเลนส์นูนกับแสงที่สะท้อนกลับจากผิวแผ่นแก้ว ดังภาพที่ 2.14 ซึ่งแสดงภาพทางเดินของแสงสำหรับเกิดการแทรกสอดกันเป็นริ้วของการแทรกสอดรูปวงกลมซ้อนร่วมจุดศูนย์กลางกัน ซึ่งเรียกว่า วงแหวนของนิวตัน (Newton's ring)

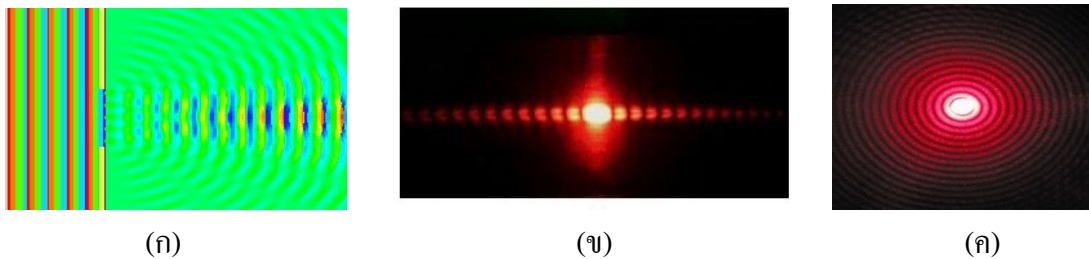


ภาพที่ 2.14 ภาพทางเดินของแสงการเกิดวงแหวนของนิวตัน

การเกิดวงแหวนของนิวตันนำไปใช้ประโยชน์ในการทดสอบความถูกต้องของผิวโค้งของแก้วที่ฝนทำเลนส์ได้ สำหรับเลนส์นูนให้นำไปประกบกับผิวแก้วมาตรฐานที่เป็นผิวโค้งเว้า ถ้าผิวโค้งของแก้วที่ฝนทำเลนส์ยังไม่ได้มาตรฐานจะประกบกันไม่สนิท มีฟิล์มบางของอากาศอยู่ระหว่างผิวแก้ว เมื่อส่องแสงลงไปจะเกิดวงแหวนของนิวตันขึ้นถ้าผิวโค้งของแก้วที่ฝนทำเลนส์ได้มาตรฐาน เมื่อส่องแสงลงไปจะเห็นผิวแก้วมืดไปหมด (ไม่เกิดวงแหวนของนิวตัน)

## 2.6 การเลี้ยวเบนของแสง (Diffraction)

เมื่อแสงความยาวคลื่นค่าเดียวตกกระทบสลิตเดี่ยว หรือช่องแคบเดี่ยวที่มีความกว้างใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง ดังภาพที่ 2.15 (ก) แสงจะเลี้ยวเบนผ่านขอบของสลิตไปได้ โดยขอบของสลิตแต่ละข้างจะทำหน้าที่เหมือนเป็นจุดกำเนิดคลื่นให้คลื่น 2 ขบวน ที่มีความยาวคลื่นและแอมพลิจูดเท่ากัน เคลื่อนไปรวมกันหรือเกิดการแทรกสอดกันบนฉาก เกิดเป็นริ้วมืด-สว่างสลับกันบนฉาก ดังภาพที่ 2.15 (ข) ผลทำนองเดียวกันเกิดขึ้นเมื่อแสงความยาวคลื่นค่าเดียวเคลื่อนผ่านช่องเปิดกลมที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับความยาวคลื่นของแสง ดังภาพที่ 2.15 (ค)



ภาพที่ 2.15 การเลี้ยวเบนของแสง ก) แสงเลี้ยวเบนผ่านสลิต ข) ภาพบนฉากการเกิดริ้วมืด-สว่าง ค) แสงที่ผ่านช่องเปิดวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกับความยาวคลื่นแสง

ที่มา: Jon, R., ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 25 กุมภาพันธ์ 2563. จาก <https://jonrista.com/2013/03/24/the-diffraction-myth>

จากภาพที่ 2.15 สังเกตว่าริ้วสว่างกลางของริ้วการเลี้ยวเบนจากสลิตเดี่ยวมีความกว้างประมาณ 2 เท่า ของริ้วสว่างอื่นและสว่างกว่ามาก โดยความสว่างจะค่อยๆ ลดลงเมื่ออยู่ห่างจากริ้วสว่างกลางออกไป นอกจากการหาความยาวคลื่นของแสงนอกจากใช้สลิตคู่แล้ว ยังมีอุปกรณ์ทางแสงอีกอย่างหนึ่งที่ใช้หาความยาวคลื่นของแสงได้คือ **เกรตติง (Grating)** เกรตติงเป็นแผ่นแก้วหรือพลาสติกที่ประกอบด้วยช่องเล็กๆ จำนวนมากนับร้อยช่องในระยะ 1 มิลลิเมตร ถ้าฉายต้นกำเนิดแสงผ่านเกรตติง แสงจะเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงแล้วเกิดการแทรกสอดกันขึ้นเกิดเป็นจุดสว่างและจุดมืดบนฉาก ภาพที่ 2.16 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทำการทดลองการเลี้ยวเบนผ่านเกรตติง



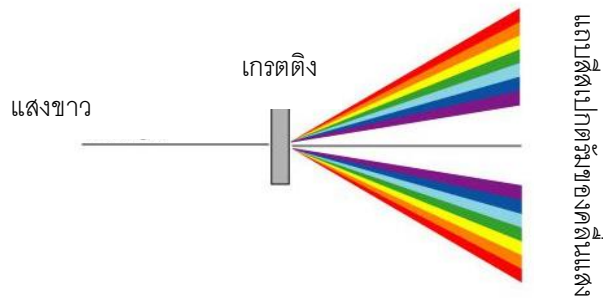
**ภาพที่ 2.16** การใช้เกรตติงในการศึกษาการของแสงเลเซอร์

**ที่มา:** สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 20 มกราคม 2563. จาก <http://physics.ipst.ac.th/?p=1359>

ถ้ารู้จำนวนช่องต่อหน่วยความยาวของเกรตติง ( $N$ ) ระยะห่างจากเกรตติงถึงฉาก ( $D$ ) และระยะห่างจากจุดสว่างกลาง ( $x$ ) ของจุดสว่างที่  $m$  จะคำนวณหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{x}{nDN} \quad (2-4)$$

ในกรณีที่ฉายแสงขาวผ่านเกรตติง แสงขาวเมื่อเลี้ยวเบนผ่านเกรตติงจะกระจายออกเกิดเป็นแถบสีต่างๆ บนฉากยกเว้นแถบกลางจะเป็นแถบสีขาว ดังภาพที่ 2.17



ภาพที่ 2.17 แสงขาวผ่านเกรตติงเกิดการกระจายแสงเป็นแถบสีต่างๆ

ที่มา: R. Nave., ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 28 กุมภาพันธ์ 2563. จาก <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html>

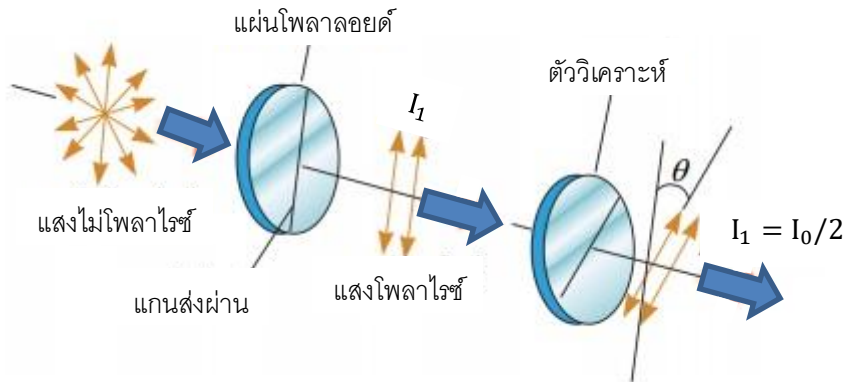
## 2.7 การโพลาไรเซชันของแสง (Polarization of light)

โพลาไรเซชัน เป็นปรากฏการณ์ที่แสดงว่าแสงเป็นคลื่นตามขวาง เนื่องจากคลื่นตามยาวจะไม่แสดงปรากฏการณ์นี้ การที่แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเป็นคลื่นตามขวาง แสงจึงประกอบด้วยสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่สั่นตั้งฉากกันในระนาบที่ตั้งฉากกับทิศการแผ่ของคลื่น ทิศการสั่นของสนามไฟฟ้า กำหนดให้เป็นทิศของโพลาไรเซชัน แสงธรรมชาติที่ไม่โพลาไรส์ (unpolarized light) ประกอบด้วยเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าที่สั่นในทุกทิศทาง และอยู่บนระนาบที่ตั้งฉากกับทิศทางการแผ่ของคลื่น แสงโพลาไรส์ (polarized light) จะประกอบด้วยสนามไฟฟ้า ซึ่งสั่นในแนวใดแนวหนึ่งเท่านั้น เช่น ในแนวตั้ง แนวราบ เป็นต้น

การทำให้แสงไม่โพลาไรส์กลายเป็นแสงโพลาไรส์ทำได้หลายวิธี เช่น การให้แสงไม่โพลาไรส์ผ่านแผ่นโพลาไรซ์ ถ้าวางโพลาไรซ์ 2 แผ่น ซ้อนกัน แสงไม่โพลาไรส์ซึ่งเดิมมีความเข้มเป็น  $I_0$  เมื่อผ่านโพลาไรซ์แผ่นแรกจะมีความเข้มลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของความเข้มของแสงเดิม ถ้าความเข้มของแสงโพลาไรส์ก่อนผ่านแผ่นโพลาไรซ์แผ่นที่ 2 เป็น  $I_1$  (โดย  $I_1 = I_0/2$ ) และแกนส่งผ่านของโพลาไรซ์แผ่นแรกกับแผ่นที่ 2 ทำมุมกันเป็นมุม  $\theta$  ดังภาพที่ 2.18 โดยความเข้มของแสงโพลาไรซ์เมื่อผ่าน โพลาไรซ์แผ่นที่ 2 จะมีค่าลดลงเป็น  $I_2$  โดย  $I_2$  สัมพันธ์กับ  $I_1$  และ  $\theta$  ตามสมการที่ (2-5)

$$I_2 = I_1 \cos^2\theta \quad (2-5)$$

สมการ (2-5) นี้ เรียกว่า กฎของมาลัส (Malus's law)



ภาพที่ 2.18 ความเข้มของแสงโพลาไรซ์เมื่อผ่านแผ่นโพลาไรซ์

ที่มา: โพลาริเซชัน, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 5 มกราคม 2563 จาก

<http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/6/physics2/17Polarisation.pdf>

ตัวอย่างที่ 2.5 เมื่อมองผ่านแผ่นโพลาไรซ์ 2 แผ่น ที่วางซ้อนกัน ไปยังเทียนไข ถ้าความเข้มแสงของเทียนไขที่มองเห็นมีค่าเป็น 1 ใน 8 ของความเข้มแสงจากเทียนไข มุมระหว่างแกนส่งผ่านของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองมีค่าเท่าใด

วิธีทำ จาก  $I_2 = I_1 \cos^2 \theta$

โดยที่  $I_1 = I_0/2$  และ  $I_2 = I_0/8$

จึงได้  $\frac{I_0}{8} = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$

และ  $\frac{1}{4} = \cos^2 \theta$

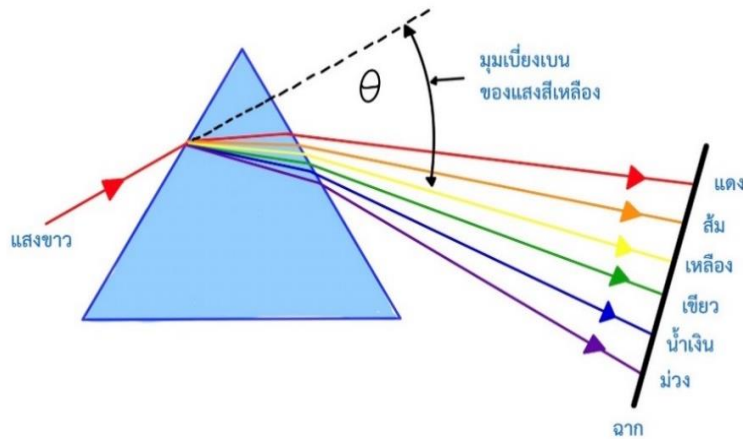
ดังนั้น  $\cos \theta = \frac{1}{2}$

และ  $\theta = \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \right) = 60^\circ$

**คำตอบ** ดังนั้นมุมระหว่างแกนส่งผ่านของแผ่นโพลาไรซ์ทั้งสองจึงมีค่าเป็น 60 องศา

## 2.8 ปรากฏการณ์ของแสง (Phenomena of light)

**2.8.1 การกระจายของแสง (Dispersion)** เป็นปรากฏการณ์การแยกตัวออกจากกันของคลื่นแสงที่มีความถี่หรือความยาวคลื่นแตกต่างกัน เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านผิวรอยต่อของตัวกลางสองชนิดสาเหตุเกิดจากค่าดัชนีหักเหของคลื่นแสงที่มีความถี่หรือความยาวคลื่นต่างกันจะมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้มุมหักเหของคลื่นแสงแต่ละความถี่หรือแต่ละความยาวคลื่นมีค่าไม่เท่ากัน เช่น แสงขาวซึ่งประกอบด้วยคลื่นแสงความถี่หรือความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน เมื่อหักเหผ่านผิวด้านข้างของปริซึมด้านหนึ่งไปทะลุออกยังผิวด้านตรงกันข้ามจะเกิดการแยกตัวออกเป็นแสงสีต่าง ๆ กันที่เรียกกันว่าแสงสีรุ้ง โดยสีม่วงจะหักเหมากที่สุดเพราะมีค่าดัชนีหักเหเมื่อผ่านแก้วสูงสุด ส่วนแสงสีแดงจะหักเหออกจากปริซึมน้อยที่สุด เพราะมีค่าดัชนีหักเหเมื่อผ่านแก้วน้อยที่สุด ดังภาพที่ 2.19



ภาพที่ 2.19 การกระจายแสงของแสงขาวเมื่อหักเหผ่านปริซึมได้เป็นแสงสีรุ้ง

รุ้ง เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่เกิดจากแสงอาทิตย์ส่องผ่านเข้าไปในละอองน้ำในอากาศแล้วเกิดการหักเหและสะท้อนกลับหมดในละอองน้ำ ทำให้เห็นแถบสีสเปกตรัมของแสงสีขาวของแสงอาทิตย์ เป็นปรากฏการณ์หนึ่งที่แสดงให้เห็นถึงการกระจายของแสงที่ชัดเจน รุ้งปฐมภูมิเกิดจากแสงแดดตกกระทบเข้าทางด้านบนของหยดน้ำซึ่งเมื่อแสงแดดตกกระทบหยดน้ำจะเกิดการหักเหหรือกระจายแสงในหยดน้ำแสง แต่ละสีจะเกิดการสะท้อนกลับหมดที่ผิวด้านในของหยดน้ำแล้วแสงแต่ละสีจะเกิดการหักเหออกจากหยดน้ำรุ้งปฐมภูมิจะเกิดการหักเห 2 ครั้งการสะท้อน 1

รุ้งทุติยภูมิเกิดจากแสงแดดตกกระทบเข้าทางด้านล่างของหยดน้ำซึ่งเมื่อแสงแดดตกกระทบหยดน้ำจะเกิดการหักเหหรือการกระจายแสงเป็นสีในหยดน้ำแสงแต่ละสีจะเกิดการสะท้อนกลับหมดครั้งที่ 1 ที่ผิวด้านในและแสงแต่ละสีจะเกิดการสะท้อนกลับหมดครั้งที่ 2 ที่ผิวด้านในแล้วแสงแต่ละสีจะเกิดการหักเหออกจากหยดน้ำรุ้งทุติยภูมิเกิดการหักเห 2 ครั้ง และการสะท้อน 2 ครั้ง

การมองเห็นรุ้งปฐมภูมิและรุ้งทุติยภูมิสามารถมองเห็นรุ้งได้ทั้งในเวลาก่อนและหลังฝนตก ดังภาพที่ 2.20



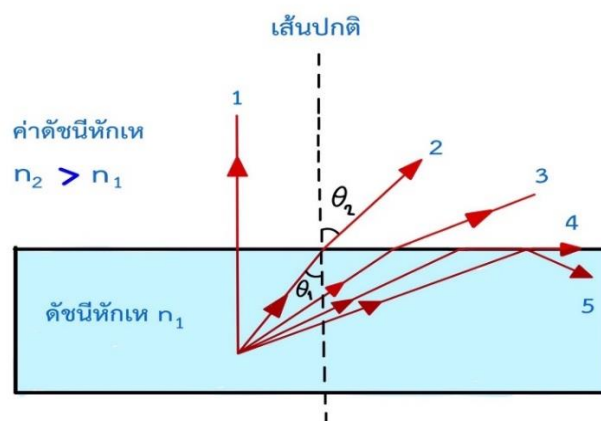
(ก) รุ้งปฐมภูมิ

(ข) รุ้งทุติยภูมิ

ภาพที่ 2.20 ภาพถ่ายจริงของรุ้งปฐมภูมิ และรุ้งทุติยภูมิโดยผู้เขียนเอง ณ ประเทศออสเตรเลีย

### 2.8.2 การสะท้อนกลับหมด (Total internal reflection)

ในกรณีที่รังสีตกกระทบเดินทางจากตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหสูงสู่ตัวกลางที่มีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่า มุมหักเหจะโตกว่ามุมตกกระทบ รังสีหักเหจะเบนออกจากเส้นแนวฉาก และจะมีมุมตกกระทบหนึ่งที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ  $90^\circ$  องศา รังสีหักเหจะขนานกับแนวรอยต่อของตัวกลาง มุมตกกระทบที่ทำให้มุมหักเหเท่ากับ  $90^\circ$  องศาเรียกว่า มุมวิกฤต  $\theta_c$  (Critical angle) ถ้ามุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤต แสงจะไม่สามารถหักเหเข้าสู่ตัวกลางใหม่ได้เลย แต่จะสะท้อนกลับสู่ตัวกลางเดิม ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การสะท้อนกลับหมด เช่น กรณีที่แสงเดินทางจากน้ำหรือแก้วเข้าสู่อากาศ ปรากฏการณ์สะท้อนกลับหมดเป็นดังภาพที่ 2.21



ภาพที่ 2.21 การสะท้อนกลับหมดเมื่อมุมตกในตัวของดัชนีหักเหของตัวกลางที่ไม่เท่ากัน

เมื่อดัชนีหักเหแสง  $n_1$  มากกว่า  $n_2$  วัตถุอยู่ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n_1$  ทำมุมตกที่ผิวรอยต่อของตัวกลางน้อยกว่ามุมวิกฤต  $\theta_c$  รังสีจะหักเหเข้าสู่ตัวกลางดัชนีหักเห  $n_2$  ได้ แต่ถ้ารังสีตกจากวัตถุทำมุมตกโตเท่ากับมุม  $\theta_c$  รังสีหักเหจะขนานกับผิวรอยต่อของตัวกลาง ไม่สามารถหักเหขึ้นสู่ตัวกลางใหม่ได้ และถ้ารังสีตกทำมุมตกโตกว่ามุมวิกฤต  $\theta_c$  รังสีจะสะท้อนกลับเข้าสู่ตัวกลางทั้งหมดเป็นการสะท้อนกลับหมด

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

เมื่อ  $\theta_1 = \theta_c$

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

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

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ$$

ดังนั้น  $\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right)$

ถ้าให้	$n_1$	แทนดัชนีหักเหของตัวกลางเดิม
	$n_2$	แทนดัชนีหักเหของตัวกลางใหม่ โดย $n_2$ มีค่ามากกว่า $n_1$
	$\theta_c$	แทนมุมวิกฤตของแสงจากตัวกลางเดิมสู่ตัวกลางใหม่
	$\theta_2$	แทนมุมหักเห $= 90^\circ$

ตัวอย่างที่ 2.7 จงหามุมวิกฤตของน้ำมัน ดัชนีหักเหเป็น  $\frac{5}{4}$  เทียบกับอากาศ

วิธีทำ กำหนดให้ น้ำมันเป็นตัวกลางที่ 1  $n_1 = \frac{5}{4}$

อากาศเป็นตัวกลางที่ 2  $n_2 = 1$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{1}{\frac{5}{4}} \right) = \sin^{-1} \left( \frac{4}{5} \right)$$

$$\theta_c = 53^\circ$$

**คำตอบ** มุมวิกฤตของน้ำมันเท่ากับ  $53$  องศา

### 2.8.3 มิราจ (Mirage)

ปรากฏการณ์มิราจเป็นการหักเหของแสงในบรรยากาศชั้นต่างๆ เนื่องจากความหนาแน่นของอากาศในชั้นต่างๆ ไม่เท่ากันมักเกิดขึ้นในบริเวณที่อากาศมีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะเกิดในวันที่อากาศร้อนจัดจะเห็นเหมือนมีสระน้ำอยู่บนพื้นถนน นั่นเป็นภาพลวงตาที่เกิดจากแสงจากท้องฟ้าหักเหและสะท้อนกลับหมดจากชั้นของอากาศร้อนบนพื้นดินที่

เป็นเช่นนี้เพราะในขณะที่แสงแดดร้อนจัดอากาศที่ใกล้ผิวถนนจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศที่อยู่สูงจากผิวถนนขึ้นไป อากาศที่อยู่ใกล้ผิวถนนจึงมีความหนาแน่นน้อยกว่าอากาศที่อยู่สูงจากผิวถนนขึ้นไป ความหนาแน่นของอากาศที่แตกต่างกันจึงเปรียบเสมือนตัวกลางที่แตกต่างกัน ดังนั้นเมื่อแสงจากท้องฟ้าเดินทางผ่านความหนาแน่นของอากาศที่แตกต่างกันแสงจึงเกิดการหักเหได้ และเมื่อมุมตกกระทบมีขนาดใหญ่กว่ามุมวิกฤต จึงเกิดการสะท้อนกลับหมด



ภาพที่ 2.22 การเกิดมิราจหรือภาพลวงตา

ที่มา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 10 มกราคม 2563.

จาก <http://www.neutron.rmutphysics.com>

## 2.9 ทศนอุปกรณ์ (Optics)

วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาทัศนอุปกรณ์นี้ คือการนำหลักการของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตไปใช้อธิบายเกี่ยวกับทัศนอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่สำคัญในชีวิตประจำวัน และอุปกรณ์ที่นักวิทยาศาสตร์ใช้ในการศึกษา เช่น แว่นขยาย กล้องจุลทรรศน์ กล้องโทรทรรศน์ เครื่องตรวจภายในลูกตา เครื่องวัดความโค้งของกระจกตา เป็นต้น

### 2.9.1 แว่นขยาย (Magnifying glass)

แว่นขยายเป็นทัศนอุปกรณ์แบบง่ายที่สุดที่ครูวิทยาศาสตร์จะมีโอกาสได้ใช้ในการเรียนการสอนห้องเรียนวิทยาศาสตร์ระดับประถมและมัธยมศึกษา โดยการใช้เลนส์นูนส่องวัตถุซึ่งให้ระยะวัตถุสั้นกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์ จะทำให้เกิดภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดโตกว่าวัตถุให้ตาอยู่ชิดกับเลนส์นูนมองดูภาพเสมือนซึ่งอยู่ด้านเดียวกับวัตถุการขยายของภาพควรจะประมาณ 3 หรือ 4 เท่า เพราะถ้าขยายมากเกินไปจะเกิดภาพที่ไม่คมชัดและตาของคนปกติจะมองเห็นภาพได้ชัดเจนที่สุดเมื่อภาพอยู่ห่างจากตาประมาณ 25 เซนติเมตร ดังนั้นจึงควรวางวัตถุห่างจากเลนส์ให้พอเหมาะที่จะภาพได้ชัดเจน ประโยชน์ของแว่นขยาย เช่น ใช้ส่องดูลายมือ แผลงต่าง ๆ เพชรพลอย เป็นต้น

และยังอาจใช้เป็นเลนส์ใกล้ตา (Eyepieces) ในกล้องจุลทรรศน์และกล้องโทรทรรศน์เพื่อทำหน้าที่ขยายภาพจริงที่ได้จากเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens)

### 2.9.2 กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)

กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 เลนส์ คือ เลนส์ใกล้วัตถุและเลนส์ใกล้ตา เลนส์ใกล้วัตถุมีความยาวโฟกัสสั้น ต้องวางวัตถุไว้ให้ห่างจากเลนส์นี้เพียงเล็กน้อยเพื่อทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับขึ้น เลนส์ใกล้ตาจะทำหน้าที่เป็นแว่นขยาย เกิดภาพเสมือนหัวตั้งขึ้น ภาพสุดท้ายนี้จะอยู่ห่างจากเลนส์ใกล้ตาประมาณ 25 เซนติเมตร กล้องจุลทรรศน์สมัยใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยอาจมีเลนส์ประกอบไว้มากกว่า 2 เลนส์ ซึ่งออกแบบไว้เพื่อทำให้เกิดภาพคมชัดยิ่งขึ้น



ภาพที่ 2.23 กล้องจุลทรรศน์

ที่มา: มุลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริ, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 6

มีนาคม 2563 จาก <http://www.princess-it.org>

### 2.9.3 กล้องโทรทรรศน์ (Telescope)

กล้องโทรทรรศน์เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ใช้ส่องดูวัตถุที่อยู่ไกลเพื่อให้เห็นภาพได้โตมากขึ้นกว่าการมองดูด้วยตาเปล่าแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเห ซึ่งใช้เลนส์นูนเป็นเลนส์ใกล้วัตถุและมีเลนส์นูนหรือเลนส์เว้า อีกอันหนึ่งเป็นเลนส์ใกล้ตา เช่น กล้องดาราศาสตร์ กล้องดูละคร เป็นต้น อีกประเภทหนึ่งของกล้องโทรทรรศน์คือ กล้องโทรทรรศน์ชนิดสะท้อนแสง ใช้กระจกที่ทำหน้าที่คล้ายเลนส์ใกล้วัตถุและมีเลนส์นูนเป็นเลนส์ใกล้ตา ในที่นี้จะกล่าวถึงกล้องโทรทรรศน์บางชนิดเท่านั้น เช่น กล้องดาราศาสตร์ ประกอบด้วยเลนส์นูน 2 เลนส์ คือ เลนส์นูนแรกหรือเลนส์ใกล้วัตถุทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับอยู่ตรงจุดโฟกัสของเลนส์ใกล้วัตถุ เลนส์นูนอันที่สองเป็นเลนส์ใกล้ตาวางอยู่ใกล้กับภาพทำหน้าที่เป็นแว่นขยายเกิดภาพเสมือนทำหน้าที่เป็นแว่นขยาย เกิดภาพเสมือนลำแสงจากวัตถุที่อยู่ไกลทำมุมกับแกนमुखสำคัญ



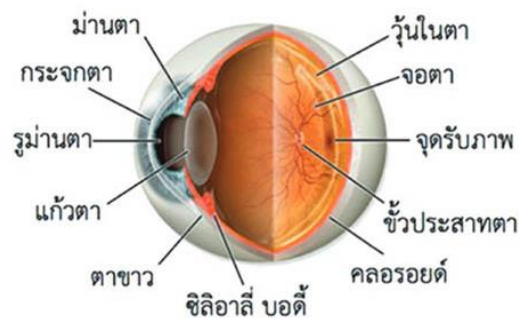
ภาพที่ 2.24 กล้องดาราศาสตร์

ที่มา: กล้องโทรทรรศน์ชนิดหักเหแสง, ออนไลน์. เข้าถึงเมื่อ 4 มีนาคม 2563 จาก

<http://www.narit.or.th/index.php/songkhla-observatory>

#### 2.9.4 ตาและการมองเห็น (Ophthalmoscope)

ตาจัดเป็นอวัยวะที่มนุษย์ใช้ในการมองวัตถุ จึงจัดเป็นสิ่งที่ช่วยให้มนุษย์มองเห็นวัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ได้ ส่วนต่าง ๆ ของนัยน์ตาสัมพันธ์กับส่วนต่าง ๆ ของกล้องถ่ายรูป โดยแสงจากวัตถุผ่านเลนส์แก้วตา (Crystalline lens) ที่มีลักษณะเป็นเลนส์นูน แล้วหักเหไปเกิดภาพจริงหัวกลับของวัตถุขึ้นที่เรตินา (Retina) ลักษณะของนัยน์ตาเป็นดังภาพที่ 2.25



ภาพที่ 2.25 ลักษณะของนัยน์ตา

ที่มา: กายวิภาคของดวงตา, ออนไลน์ เข้าถึงเมื่อ 2 เมษายน 2563.

จาก <https://www.isoptik.com>

ส่วนประกอบของนัยน์ตาประกอบด้วยเนื้อเยื่อเหนียวใสด้านหน้า เรียกว่า คอร์เนีย (Cornea) ถัดจากคอร์เนียเป็นของเหลวใสมีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับน้ำคือ 1.336 ถัดไปเป็นเลนส์

แก้วตา (Crystalline lens) ด้านหน้าของเลนส์แก้วตาเป็นม่านตา (Iris) ตรงกลางมีช่องเปิดกลม เรียกว่า รูม่านตา (Pupil) เลนส์แก้วตาประกอบด้วยเนื้อเยื่อ โปร่งแสงหลายชั้นที่มีค่าดัชนีหักเห ตั้งแต่ 1.37 ที่ชั้นนอกจนถึง 1.42 ที่กลางเลนส์ ขอบเลนส์แก้วตาจะมีกล้ามเนื้อซิลิอารี (Ciliary muscle) ยึดเลนส์แก้วตา โดยกล้ามเนื้อนี้จะสามารถควบคุมความหนาบางของเลนส์แก้วตาได้เพื่อให้เกิดภาพของวัตถุที่คมชัดบนเรตินา เพราะการปรับความหนาบางของเลนส์แก้วตา ทำให้ความยาวโฟกัสเปลี่ยนทำให้เกิดภาพที่คมชัดที่เรตินา สำหรับเรตินาประกอบด้วยใยประสาทที่แยกมาจากประสาทตา เมื่อใยประสาทที่เรตินาได้รับภาพก็จะส่งความรู้สึกไปยังประสาทตาต่อไป ยังสมองบนเรตินาตรงกับแนวสายตาวจะมีรอยบุ๋มเล็ก ๆ เรียกว่า จุดเหลือง ใจกลางจุดเหลืองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.25 มิลลิเมตร เรียกว่า โฟเวียเซนทราลิส (Fovea centralist) เป็นส่วนที่มีความไวในการมองเห็นสูงมากกว่าส่วนอื่นของเรตินา เวลาเพ่งมองวัตถุ ภาพของวัตถุจะไปตกลงตรงจุดนี้ทำให้เห็นรายละเอียดของวัตถุที่เพ่งมองได้ชัดเจนขึ้น บริเวณที่ประสาทตาต่อกับเรตินา เรียกว่าจุดบอด (Blind spot) เป็นจุดที่ไม่มีเซลล์รับแสงอยู่เลย เมื่อมีแสงมาตกที่จุดนี้จะมองไม่เห็นสิ่งใด ระหว่างเลนส์กับเรตินาจะเป็นของเหลวใสที่มีค่าดัชนีหักเหใกล้เคียงกับของน้ำใยประสาทที่เรตินา จะมีส่วนที่ไวต่อแสงเรียกว่า เซลล์รูปแท่ง (Rods cell) และเซลล์รูปกรวย (Cones cell) เซลล์รูปแท่งจะทำให้มองเห็นสิ่งต่าง ๆ ในที่มีมืดสลัวหรือกลางคืน แต่ไม่สามารถแยกสีได้ ส่วนเซลล์รูปกรวยจะทำให้มองเห็นในตอนกลางวันและเห็นรายละเอียดได้ดี ส่วนรูม่านตาจะทำหน้าที่ควบคุมปริมาณแสงเข้าสู่รูม่านตา ถ้าแสงน้อยรูม่านตาจะขยายใหญ่ ถ้าแสงมากรูม่านตาจะเล็กลง

ความผิดปกติของนัยน์ตาที่พบบ่อย คือ อาการสายตาสั้นและสายตายาว การใส่แว่นตาที่ทำด้วยเลนส์นูนเพื่อให้ภาพเข้ามาเกิดบนเรตินา ส่วนผู้ที่มึนกล้ามเนื้อแข็งแรงมากจนบังคับให้เลนส์มีความหนาเกินไปจะทำให้ภาพเกิดก่อนถึงเรตินา เรียกว่า เกิดอาการสายตาสั้น สามารถแก้ไขโดยการใส่แว่นตาที่ทำด้วยเลนส์เว้าเพื่อยืดระยะภาพให้ไปตกพอดีเรตินาก็จะทำให้เห็นภาพได้ชัดเป็นปกติ อาการผิดปกติอีกอย่างหนึ่งของนัยน์ตาคือสายตาเอียง ซึ่งเกิดจากผิวของคอร์เนียไม่เป็นทรงกลม ทำให้ไม่สามารถมองเห็นเส้นในแนวตั้งและแนวราบได้ชัดเจนพร้อมกัน ซึ่งแก้ไขได้โดยใช้เลนส์ทรงกระบอกหรือเลนส์กาบกล้วย

## 2.10 บทสรุป

แสงเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาคในเวลาเดียวกัน ในบทนี้เราศึกษาแสงเชิงเรขาคณิต สมบัติการสะท้อนของแสงช่วยในการศึกษาการมองเห็นวัตถุในลักษณะต่างๆ ผ่านกระจกและเลนส์ กล่าวคือ เมื่อมีวัตถุอยู่หน้ากระจกเงาระนาบจะมีรังสีของแสงกระจายออกจากวัตถุไปตกที่ผิวกระจก ด้วยมุมตกกระทบที่มีค่าต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมาก จึงมีรังสีสะท้อนออกจากผิวกระจกในทิศทางทำ

มุมสะท้อนต่าง ๆ กันเป็นจำนวนมากเช่นเดียวกัน และเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง ภาพที่เกิดจากกระจกเว้าจะเกิดได้ 3 ลักษณะตามตำแหน่งของวัตถุที่อยู่หน้ากระจก เมื่อวัตถุอยู่หน้ากระจกนูน การเขียนแนวรังสีตกทั้งสามกรณีเป็นเช่นเดียวกับกระจกเว้า จะได้แนวรังสีสะท้อนเสมือนว่าไปตัดกัน เกิดภาพเสมือนหัวตั้งขนาดย่อข้างหลังกระจก ถ้าวัตถุอยู่ชิดกระจกจะได้ภาพเสมือนขนาดเท่าวัตถุอยู่ชิดกระจกเช่นกัน และถ้าวัตถุอยู่ระยะอนันต์จากกระจกจะได้ภาพเสมือนเป็นจุดอยู่ที่จุดโฟกัสของกระจก จะเห็นได้ว่าภาพที่เกิดจากกระจกนูนจะเป็นภาพเสมือนหลังกระจกได้กรณีเดียวเท่านั้น เลนส์ เป็นอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ที่อาศัยการหักเหของแสงในการเปลี่ยนเส้นทางของแสง เลนส์แบ่งออกเป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ เลนส์นูน และเลนส์เว้า ทัศนอุปกรณ์เป็นการนำหลักการของทัศนศาสตร์เชิงเรขาคณิตไปใช้อธิบายเกี่ยวกับทัศนอุปกรณ์ เช่น แว่นขยาย กล้องจุลทรรศน์ กล้องโทรทรรศน์ เครื่องตรวจภายในลูกตา เครื่องวัดความโค้งของกระจกตา เป็นต้น ดวงตาจัดเป็นอวัยวะที่ช่วยให้มนุษย์มองเห็นวัตถุหรือสิ่งต่าง ๆ ได้ ส่วนต่าง ๆ ของนัยน์ตาคัลล้ายกับส่วนต่าง ๆ ของกล้องถ่ายรูป โดยแสงจากวัตถุผ่านเลนส์แก้วตาที่มีลักษณะเป็นเลนส์นูน แล้วหักเหไปเกิดภาพจริงหัวกลับของวัตถุขึ้นที่เรตินา

## แบบฝึกหัด

- นำวัตถุมาวางด้านหน้าของกระจกที่มีรัศมีความโค้ง 35 เซนติเมตร โดยวางห่างจากกระจกเป็นระยะที่ทำให้เกิดภาพจริงขนาดใหญ่เป็น 2.5 เท่าของวัตถุอยากทราบว่าวัตถุห่างจากกระจกเป็นระยะเท่าไร [คำตอบ 24.5 เซนติเมตร]
- ชายคนหนึ่งสูง 1.8 เมตร ยืนอยู่ริมสระว่ายน้ำ ห่างจากขอบสระ 2.4 เมตร ถ้าเข้ากันสระลึก 3 เมตร จงหาระยะลึกจริงของก้นสระ ถ้าดัชนีหักเหของน้ำเท่ากับ  $4/3$  [คำตอบ 16/3 เมตร]
- เสาต้นหนึ่งปักเอียง  $53.1^\circ$  กับผิวน้ำ โดยมีบางส่วนของเสาปักในน้ำ เมื่อมองลงไปในแนวตั้ง จะเห็นส่วนของเสาที่จมอยู่ในน้ำเอียงทำมุมเท่ากับผิวน้ำ [คำตอบ  $45^\circ$ ]
- แท่งแก้วแผ่นหนึ่งหนา 18 เซนติเมตร อยู่ใต้น้ำลึก 20 เซนติเมตร แท่งแก้วนี้วางทับวัตถุบางอย่างอยู่ ถ้าดัชนีหักเหของแก้วและน้ำ มีค่าเป็น  $3/2$  และ  $4/3$  ตามลำดับ
  - เมื่อมองลงไปตรงๆ จากอากาศจะเห็นวัตถุลอยสูงขึ้นมาเท่าใด [คำตอบ 11 เซนติเมตร]
  - เมื่อมองลงไปตรงๆ โดยลึ้มตามองดูในน้ำ จะเห็นวัตถุลอยสูงขึ้นเท่าใด [คำตอบ 2 เซนติเมตร]
- ชายคนหนึ่งซึ่งนั่งอยู่ในเรือลำเล็กๆ ในมหาสมุทร เป็นปลาฉลามตัวหนึ่งว่ายผ่านใต้ท้องเรือไปที่ความลึก 4.5 เมตร ชายคนนี้จะมองไม่เห็นปลาฉลามตัวนี้ เมื่อปลาฉลามว่ายห่างออกไปจากเขาเท่าใด (ระยะแนวราบ) สมมติว่าตาของชายคนนี้อยู่ใกล้ผิวน้ำมากและดัชนีหักเหของน้ำทะเลเท่ากับ  $4/3$  [คำตอบ 5.1 เมตร]
- กระจกเว้าบานหนึ่ง เมื่อรับแสงจากดวงอาทิตย์จะเกิดภาพของดวงอาทิตย์ที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร จากกระจก เมื่อนำวัตถุมาวางหน้ากระจกเว้านี้ที่ระยะ 16 เซนติเมตร จากกระจก จะเกิดภาพชนิดใดที่ตำแหน่งใด [คำตอบ ภาพเสมือน ที่ระยะ 60 เซนติเมตร จากกระจก ด้านหลังกระจก]
- ถ้าต้องการแยกภาพของไดโอดเปล่งแสง ซึ่งสูง 4 มิลลิเมตรลงบนแกน โดยใช้กระจกโค้งฉากอยู่ห่างออกไป 90 เซนติเมตร ทางด้านซ้ายของกระจกโค้งและไดโอดเปล่งแสงอยู่ตรงกึ่งกลางระหว่างกระจก โค้งกับฉาก จะต้องใช้กระจก โค้งชนิดใด ความยาวโฟกัสเท่าใดและภาพของไดโอดเปล่งแสง สูงเท่าใด [คำตอบ ความยาวโฟกัส 30 เซนติเมตรและภาพสูง 8 เซนติเมตร]
- ใช้แสงมีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ตกตั้งฉากผ่านสลิตเดี่ยว ที่มีความกว้างของช่องเท่ากับ 50 เมตร จากการสังเกตภาพเลี้ยวเบนบนฉากพบว่าแถบมืดแถบแรกอยู่ห่างจากกึ่งกลางแถบสว่าง กลาง 6 มิลลิเมตร ระยะห่างระหว่างสลิตเดียวกับฉากเป็นเท่าใดในหน่วยเซนติเมตร [คำตอบ 75 เซนติเมตร]

## เอกสารอ้างอิง

- ก่องกัญจน์ ภัทรากาญจน์ และ ชนกาญจน์ ภัทรากาญจน์. (2554). **ฟิลิกส์ 2: ตัวอย่างและโจทย์พร้อมคำเฉลย**. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มูลนิธิเทคโนโลยีสารสนเทศตามพระราชดำริ. *กล้องจุลทรรศน์*. สืบค้น 6 มีนาคม 2563. จาก <http://www.princess-it.org>
- ทวี ฉิมน้อย และมนู เพ็ญพุ่ม. (2541). **ฟิลิกส์พื้นฐานระดับมหาวิทยาลัย 1**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ปิยพงษ์ สิทธิคง. (2548). **ฟิลิกส์ระดับอุดมศึกษา เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: วิรัตน์ เอ็ดดูเคชั่น จำกัด
- แพทย์หญิงณัฐธิดา นีมวรพันธุ์. *กายวิภาคของดวงตา*. สืบค้น 2 มีนาคม 2563. จาก <https://www.isoptik.com>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *การแทรกสอดที่เกิดจากแสงสองแหล่ง*. สืบค้น 25 มีนาคม 2556. จาก <http://www.rmutphysics.com>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *การหักเหของแสง*. สืบค้น 1 มีนาคม 2563. จาก <http://www.neutron.rmutphysics.com>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *แสงสีขาวผ่านปริซึม*. สืบค้น 1 มีนาคม 2563. จาก [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_25.html](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_25.html)
- วิฑูร ชื่นวชิรศิริ และวีระชัย สิริพันธ์วรารณณ์. (2550). **ฟิลิกส์เบื้องต้น**. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยมหิดล.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *โพลาริเซชัน*. สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ 2563. จาก <http://www.rmutphysics.com/charud/pdf-learning/6/physics2/17Polarisation.pdf>
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล. *Learning atomic*. สืบค้น 20 กุมภาพันธ์ 2563. จาก <http://www.atom.rmutphysics.com/charud/oldnews/0/286/2/4/atom/bo2.htm>
- สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ. *กล้องดาราศาสตร์*. สืบค้น 4 มีนาคม 2563. จาก <http://www.narit.or.th/index.php/songkhla-observatory>
- สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. *การทดลองเกรตติง*. สืบค้น 20 มกราคม 2563 จาก <http://physics.ipst.ac.th/?p=1359>
- อนุกรรมการปรับปรุงหลักสูตรวิทยาศาสตร์ ทบวงมหาวิทยาลัย. (2543). **ฟิลิกส์ เล่ม 2**. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์.
- Brown, Paige. (2011). *Light Logic for 'Light'-ning Fast Computers*. สืบค้น 25 มีนาคม 2556 จาก, [http://www.scilogis.com/from\\_the\\_lab\\_bench/light-logic-for-light-ning-fast-](http://www.scilogis.com/from_the_lab_bench/light-logic-for-light-ning-fast-)

computers/

Cutnell, J. D., and Johnson, K. W. (2005). *Physics*. Hoboken, NJ: John Wiley & Son.

Davidson, Michael W. (2003). *Polarized Light Microscopy*. สืบค้น 25 กุมภาพันธ์ 2556. จาก

<http://www.micro.magnet.fsu.edu>

Giancoli, D.C. (1998). **Physics**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Halliday, David., Resnick, Robert., and Walker, Jearl. (2005). **Fundamentals of Physics**

(7<sup>th</sup>ed). New York: John Willey& Son.

Hecht, E. (2002). **Optics**(4<sup>th</sup> ed). San Francisco: Addison Wesley.

Jon, R. *Diffraction of Light*. สืบค้น 25 กุมภาพันธ์ 2563. จาก[https://jonrista.com/2013/03/24/the-](https://jonrista.com/2013/03/24/the-diffraction-myth)

[diffraction-myth](https://jonrista.com/2013/03/24/the-diffraction-myth)

R. Nave. *Diffraction Grating*. สืบค้น 28 กุมภาพันธ์ 2563. จาก [http://hyperphysics.phy-](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html)

[astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/grating.html)

Serway, Raymond A. (2006). **Serway's Principles of Physics a Calculus-based Text**

(4<sup>th</sup>ed). California: Thomson Learning.

Serway, R.A. and Beichner, J.B. (2004). **Physics for Science and Engineers with Modern**

**Physics** (6<sup>th</sup>ed). Philadelphia:Saunders.

Young, Hugh D. (1992). **University Physics** (8<sup>th</sup>ed). New York: Addison Wesley.