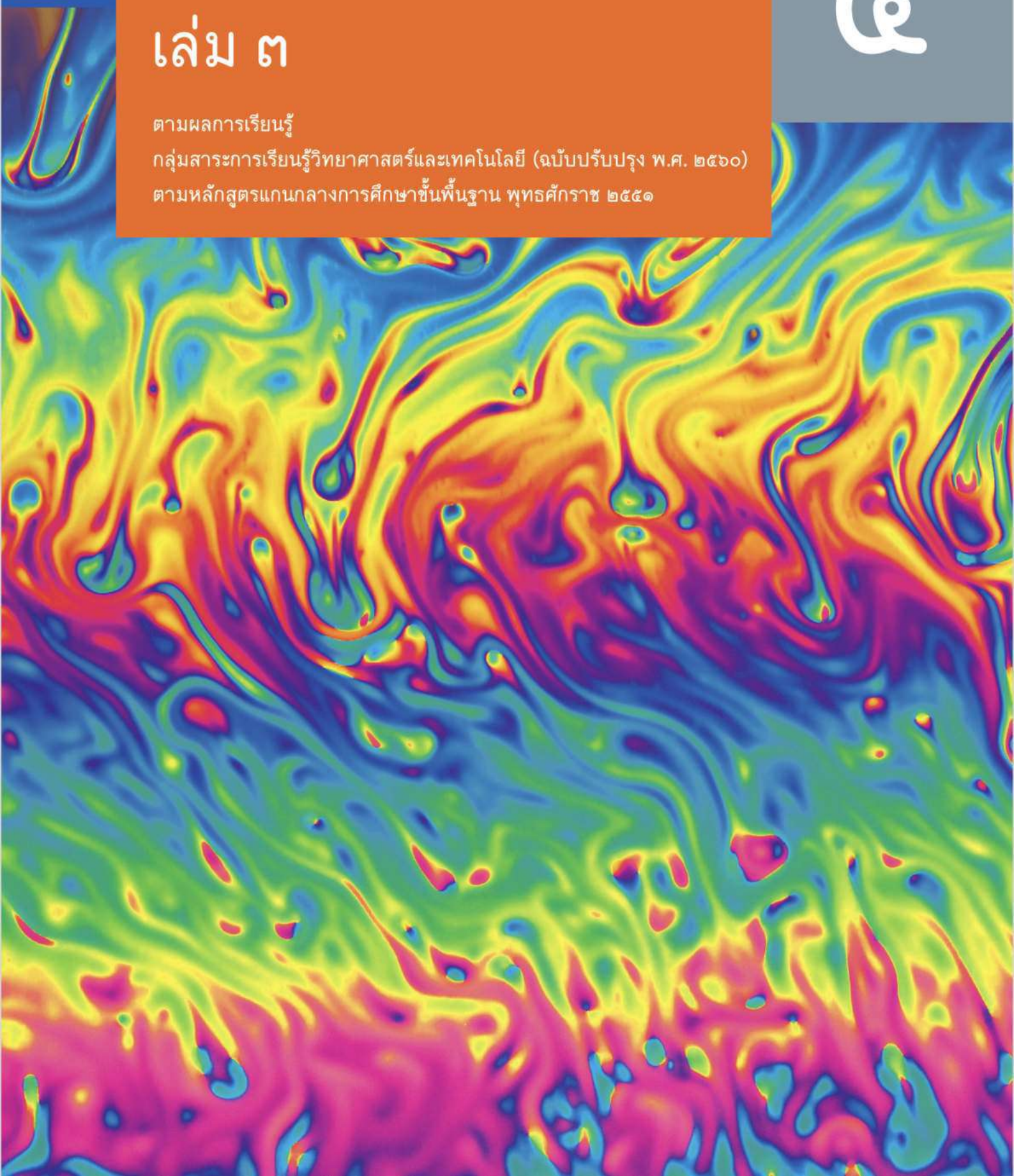
หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕

ฟิสิกส์
เล่ม ๓

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑



ตัวอักษรกรีก

ตัวอักษรเล็ก	ตัวอักษรใหญ่	ชื่อ	
α	A	alpha	แอลฟา
β	B	beta	บีตา
γ	Γ	gamma	แกมมา
δ, ∂	Δ	delta	เดลตา
ε	E	epsilon	เอปไซลอน
ζ	Z	zeta	ซีตา
η	H	eta	อีตา
θ	Θ	theta	ทีตา
ι	I	iota	ไอโอตา
κ	K	kappa	แคปปา
λ	Λ	lambda	แลมบ์ดา
μ	M	mu	มิว

ตัวอักษรเล็ก	ตัวอักษรใหญ่	ชื่อ	
ν	N	nu	นิว
ξ	Ξ	xi	ไซ
o	O	omicron	โอไมครอน
π	Π	pi	พาย
ρ	P	rho	โร
σ	Σ	sigma	ซิกมา
τ	T	tau	เทา
υ	Y	upsilon	อิปไซลอน
ϕ	Φ	phi	ฟาย, ฟี
χ	X	chi	ไค
ψ	Ψ	psi	ซาย
ω	Ω	omega	โอเมกา

ราชบัณฑิตยสถาน ศัพท์คณิตศาสตร์ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พิมพ์ครั้งที่ ๙ แก้ไขเพิ่มเติม กรุงเทพ : ราชบัณฑิตยสถาน, ๒๕๔๙.

หนังสือเรียน

รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ฟิสิกส์

ชั้น

มัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓

ตามผลการเรียนรู้
กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)
ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑

จัดทำโดย
สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงศึกษาธิการ

จัดทำเป็นฉบับ e-book ครั้งที่ ๑ พ.ศ. ๒๕๖๓

มีลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติ

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำหนังสือเรียนฉบับ e-book นี้ขึ้น โดยมีเนื้อหาเช่นเดียวกันกับหนังสือเรียน สสวท. ฉบับสื่อสิ่งพิมพ์ที่ได้จัดทำตามมาตรฐานหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ทุกประการ เพื่ออำนวยความสะดวกในการเข้าถึงหนังสือเรียน สสวท. ผ่านเทคโนโลยีดิจิทัลเพื่อให้นักเรียน ครู ผู้ปกครอง นักวิชาการ และ ผู้สนใจทั่วไปเข้าถึงได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว รวมทั้งสามารถเลือกใช้ตามความเหมาะสมกับจุดประสงค์ต่าง ๆ

ทั้งนี้ สสวท. ขอสงวนสิทธิ์ในหนังสือเรียน ฉบับ e-book นี้ตามกฎหมายลิขสิทธิ์ ห้ามผู้ใดทำซ้ำ คัดลอก ดัดแปลง เลียนแบบ จำหน่าย หรือ เผยแพร่โดยมิได้รับอนุญาต

คำชี้แจง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สสวท.) ได้จัดทำตัวชี้วัดและสาระการเรียนรู้แกนกลาง กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช ๒๕๕๑ โดยมีจุดเน้นเพื่อพัฒนาผู้เรียนให้มีความรู้ความสามารถที่ทัดเทียมกับนานาชาติ ได้เรียนรู้วิทยาศาสตร์ที่เชื่อมโยงความรู้กับกระบวนการ ใช้กระบวนการสืบเสาะหาความรู้และแก้ปัญหาที่หลากหลาย มีการทำกิจกรรมด้วยการลงมือปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนได้ใช้ทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์และทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ซึ่งในปีการศึกษา ๒๕๖๑ เป็นต้นไป โรงเรียนจะต้องใช้หลักสูตรกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐) สสวท. จึงได้จัดทำหนังสือเรียนที่เป็นไปตามมาตรฐานหลักสูตรเพื่อให้โรงเรียนได้ใช้สำหรับจัดการเรียนการสอนในชั้นเรียน

หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ เล่ม ๓ นี้ มีผลการเรียนรู้และสาระการเรียนรู้เพิ่มเติมที่ครอบคลุมเนื้อหาบางส่วนที่ปรากฏตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ โดยเมื่อผู้เรียนเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๑ - เล่ม ๖ ครบทุกชั้นปีในชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๔ - ๖ แล้วก็สามารถบรรลุผลสัมฤทธิ์ตามตัวชี้วัดของรายวิชาพื้นฐานวิทยาศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ เล่ม ๒ ได้ และในขณะเดียวกันก็สามารถต่อยอดเนื้อหาจากรายวิชาพื้นฐานไปสู่เนื้อหาในรายวิชาเพิ่มเติมได้โดยไม่ต้องเสียเวลาเรียนซ้ำซ้อน ทั้งนี้หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๓ นี้ มีเนื้อหาที่จำเป็นต้องเรียนประกอบด้วยเรื่องการสั่น คลื่น แสงเชิงคลื่น และแสงเชิงรังสี ซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการศึกษาต่อในระดับอุดมศึกษาในด้านวิทยาศาสตร์ หรือประกอบอาชีพในสาขาที่ใช้วิทยาศาสตร์เป็นฐาน เช่น แพทย์ ทันตแพทย์ สัตวแพทย์ เทคโนโลยีชีวภาพ เทคนิคการแพทย์ วิศวกรรม สถาปัตยกรรม วัสดุศาสตร์ อุตุนิยมวิทยา ธรณีวิทยา ฯลฯ โดยเน้นกระบวนการคิดวิเคราะห์และการแก้ปัญหา เชื่อมโยงความรู้สู่การนำไปใช้ในชีวิตจริง ผู้เรียนจะได้ทำกิจกรรมที่เป็นพื้นฐานที่สำคัญ รวมทั้งกิจกรรมที่ผู้เรียนสามารถคิดค้นและออกแบบการทดลองด้วยตนเอง มีแบบฝึกหัดเพื่อให้ตรวจทานความรู้หลังจากที่เรียนไปแล้ว รวมทั้งสรุปความรู้ในแต่ละบทด้วย ในการจัดทำหนังสือเรียนเล่มนี้ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ทรงคุณวุฒิ นักวิชาการอิสระ คณาจารย์ทั้งหลาย รวมทั้งครูผู้สอน นักวิชาการ จากสถาบันและสถานศึกษาทั้งภาครัฐและเอกชน จึงขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สสวท. หวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์ ฟิสิกส์ เล่ม ๓ นี้ จะเป็นประโยชน์แก่ผู้เรียนและผู้ที่เกี่ยวข้องทุกฝ่าย ที่จะช่วยให้การจัดการศึกษาด้านวิทยาศาสตร์มีประสิทธิภาพและประสิทธิผล หากมีข้อเสนอแนะใดที่จะทำให้หนังสือเรียนเล่มนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น โปรดแจ้ง สสวท. ทราบด้วย จะขอบคุณยิ่ง

(ศาสตราจารย์ชูกิจ ลิมปิจำนงค์)
ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ

คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม

ฟิสิกส์ เล่ม ๓ **กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี**

(ฉบับปรับปรุง พ.ศ. ๒๕๖๐)

ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ ๕ **เวลา ๘๐ ชั่วโมง จำนวน ๒ หน่วยกิต**

ศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสริงและลูกตุ้มอย่างง่าย ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้อง ธรรมชาติของคลื่น อัตราเร็วของคลื่น หลักการที่เกี่ยวกับคลื่น พฤติกรรมของคลื่น แนวคิดเกี่ยวกับแสงเชิงคลื่น การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่ การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว การเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติง การสะท้อนและการหักเหของแสง การมองเห็นและการเกิดภาพ ภาพจากเลนส์และกระจกเงาทรงกลม แสงสีและการมองเห็นแสงสี ปรากฏการณ์ธรรมชาติและการใช้ประโยชน์เกี่ยวกับแสง โดยใช้กระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การสืบเสาะหาความรู้ การสืบค้นข้อมูล การสังเกต วิเคราะห์ เปรียบเทียบ อธิบาย อภิปราย และสรุป เพื่อให้เกิดความรู้ ความเข้าใจ มีความสามารถในการตัดสินใจ มีทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ รวมทั้งทักษะแห่งศตวรรษที่ ๒๑ ในด้านการใช้เทคโนโลยีสารสนเทศ ด้านการคิดและการแก้ปัญหา สามารถสื่อสารสิ่งที่เรียนรู้และนำความรู้ไปใช้ในชีวิตของตนเอง มีจิตวิทยาศาสตร์ จริยธรรม คุณธรรม และค่านิยมที่เหมาะสม

ผลการเรียนรู้

๑. ทดลองและอธิบายการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของวัตถุติดปลายสริงและลูกตุ้มอย่างง่าย รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๒. อธิบายความถี่ธรรมชาติของวัตถุและการเกิดการสั่นพ้อง

๓. อธิบายปรากฏการณ์คลื่น ชนิดของคลื่น ส่วนประกอบของคลื่น การแผ่ของหน้าคลื่นด้วยหลักการของฮอยเกนส์ และการรวมกันของคลื่นตามหลักการซ้อนทับ พร้อมทั้งคำนวณอัตราเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่น

๔. สังเกตและอธิบายการสะท้อน การหักเห การแทรกสอด และการเลี้ยวเบนของคลื่นผิวน้ำ รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๕. ทดลอง และอธิบายการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่และเกรตติง การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตเดี่ยว รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๖. ทดลอง และอธิบายการสะท้อนของแสงที่ผิววัตถุตามกฎการสะท้อน เขียนรังสีของแสงและคำนวณตำแหน่งและขนาดภาพของวัตถุ เมื่อแสงตกกระทบกระจกเงาราบและกระจกเงาทรงกลม รวมทั้งอธิบายการนำความรู้เรื่องการสะท้อนของแสงจากกระจกเงาราบ และกระจกเงาทรงกลมไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน

๗. ทดลอง และอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างดรรชนีหักเห มุมตกกระทบ และมุมหักเหรวมทั้งอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความลึกจริงและความลึกปรากฏ มุมวิกฤตและการสะท้อนกลับหมดของแสง และคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

๘. ทดลอง และเขียนรังสีของแสงเพื่อแสดงภาพที่เกิดจากเลนส์บาง หาตำแหน่ง ขนาด ชนิดของภาพ และความสัมพันธ์ระหว่างระยะวัตถุ ระยะภาพและความยาวโฟกัส รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และอธิบายการนำความรู้เรื่องการหักเหของแสงผ่านเลนส์บางไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน

๙. อธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกี่ยวกับแสง เช่น รุ้ง การทรงกลด มิราจ และการเห็นท้องฟ้าเป็นสีต่าง ๆ ในช่วงเวลาต่างกัน

๑๐. สังเกต และอธิบายการมองเห็นแสงสี สีของวัตถุ การผสมสารสี และการผสมแสงสี รวมทั้งอธิบายสาเหตุของการบอดสี

รวมทั้งหมด ๑๐ ผลการเรียนรู้

ข้อแนะนำทั่วไปในการใช้หนังสือเรียน

หนังสือเรียนเป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อให้นักเรียนได้ใช้ในการศึกษาเนื้อหาที่สำคัญและเกิดทักษะที่จำเป็นที่สอดคล้องกับมาตรฐานและสาระการเรียนรู้ รวมทั้งยังมีสื่อที่ช่วยเสริมการเรียนรู้ของนักเรียน โดยสามารถเชื่อมต่อไปยังหน้าเว็บไซต์รายการสื่อได้จาก QR code หรือ URL ที่อยู่ประจำแต่ละบท การทำความเข้าใจเกี่ยวกับสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียนจะช่วยให้นักเรียนใช้หนังสือเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งสัญลักษณ์หรือข้อความตามหัวข้อต่าง ๆ ที่ปรากฏในหนังสือเรียน มีดังนี้

- คำถามสำคัญ
- จุดประสงค์การเรียนรู้
- ความรู้ก่อนเรียน
- ข้อสังเกต
- ชวนคิด
- กิจกรรม
- คำถามท้ายกิจกรรม
- กิจกรรมลองทำดู
- ความรู้เพิ่มเติม
- รู้หรือไม่
- สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน
- แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ
- แบบฝึกหัดท้ายบท

คำถามสำคัญ

คำถามประจำบทที่นักเรียนต้องอาศัยความรู้ทั้งหมดในบทเรียนในการตอบคำถาม ซึ่งนักเรียนควรตอบได้หลังจากได้เรียนรู้ในบทนั้นแล้ว

จุดประสงค์การเรียนรู้

เป้าหมายของการจัดการเรียนรู้ที่ต้องการให้นักเรียนเกิดความรู้หรือทักษะหลังจากผ่านกิจกรรมการจัดการเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ ซึ่งนักเรียนควรศึกษาทำความเข้าใจก่อนเริ่มเรียนรู้ในแต่ละหัวข้อ

ความรู้ก่อนเรียน

คำสำคัญหรือข้อความสั้น ๆ ที่เกี่ยวกับความรู้ที่นักเรียนควรมีสำหรับเป็นพื้นฐานของการศึกษาความรู้ใหม่ในแต่ละบท

ข้อสังเกต

ความรู้ที่เกี่ยวข้องเพื่อให้นักเรียนเห็นแนวคิดสำคัญและความเชื่อมโยงของเนื้อหา

ชวนคิด

คำถามระหว่างเรียนที่เชื่อมโยงหรือต่อยอดความรู้เดิมที่ศึกษาแล้วกับความรู้ใหม่หรือความรู้ในศาสตร์อื่น เพื่อให้นักเรียนเห็นความสัมพันธ์หรือความต่อเนื่องของเนื้อหา

กิจกรรม

การปฏิบัติที่ช่วยในการเรียนรู้เนื้อหาหรือฝึกฝนให้เกิดทักษะตามจุดประสงค์การเรียนรู้ของบทเรียน โดยอาจเป็นการทดลอง การสืบค้นข้อมูล หรือกิจกรรมอื่น ๆ ซึ่งนักเรียนควรลงมือปฏิบัติกิจกรรมด้วยตนเอง

คำถามท้ายกิจกรรม

คำถามที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมนั้น ๆ ช่วยเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ อภิปรายและสรุปผลการทำกิจกรรม

กิจกรรมลองทำดู

การปฏิบัติที่ช่วยเสริมความรู้ที่เกี่ยวข้องกับเนื้อหาในบทเรียน ซึ่งอาจเป็นกิจกรรมที่ลงมือปฏิบัติในห้องเรียนหรือนอกเวลาเรียนได้

ความรู้เพิ่มเติม

ความรู้ที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาในบทเรียน เพื่อให้นักเรียนมีความรู้ความเข้าใจมากขึ้นโดยไม่มีการวัดและประเมินผล

รู้หรือไม่

ความรู้ที่เชื่อมโยงให้เห็นความสอดคล้องของเนื้อหาบทเรียนกับปรากฏการณ์หรือสถานการณ์ในชีวิตประจำวัน

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

การสรุปเนื้อหาสำคัญภายในบทเรียน เพื่อช่วยให้เห็นภาพรวมของเนื้อหาทั้งหมด

แบบฝึกหัดท้ายหัวข้อ

ประกอบด้วย 2 ส่วน ดังนี้

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ

คำถามระหว่างเรียนที่ช่วยประเมินการเรียนรู้ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบว่า ตนเองมีความรู้ความเข้าใจในเนื้อหาแล้วหรือยัง

แบบฝึกหัด

แบบฝึกหัดระหว่างเรียนที่ช่วยฝึกทักษะการคิด การคำนวณ และการแก้ปัญหาเบื้องต้น โดยใช้ความรู้ในหัวข้อนั้น ๆ ซึ่งนักเรียนสามารถใช้ตรวจสอบความเข้าใจของเนื้อหาและฝึกฝนตนเองให้มีทักษะที่จำเป็นตามจุดประสงค์การเรียนรู้ได้

แบบฝึกหัดท้ายบท

ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

คำถาม

คำถามที่เน้นให้นักเรียนตอบโดยการเขียนบรรยายแสดงความเข้าใจจนถึงการวิเคราะห์

ปัญหา

ปัญหาที่มีความซับซ้อนน้อยจนถึงปานกลาง เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคำนวณและการแก้ปัญหา

ปัญหาท้าทาย

ปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก เน้นให้นักเรียนได้ใช้ทักษะการคิดระดับสูงในการคำนวณและการแก้ปัญหา

สารบัญ

บทที่ 8-9

บทที่	เนื้อหา	หน้า
8	**การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย**	
	8.1 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	3
	8.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	5
	8.2.1 การกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	6
	8.2.2 ความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย	10
	8.3 แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มอย่างง่าย	15
	8.3.1 การสั่นของมวลติดปลายสปริง	15
	8.3.2 การแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย	26
	8.4 ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้อง	33
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	37
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8	39
9	**คลื่น**	
	9.1 ธรรมชาติของคลื่น	49
	9.1.1 การเกิดคลื่น	50
	9.1.2 ชนิดของคลื่น	51
	9.1.3 ส่วนประกอบของคลื่น	56
	9.2 อัตราเร็วของคลื่น	61
	9.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว ความถี่และความยาวคลื่น	61
	9.2.2 อัตราเร็วของคลื่นในตัวกลาง	63
	9.3 หลักการที่เกี่ยวกับคลื่น	69
	9.3.1 หลักการของฮอยเกนส์	69
	9.3.2 หลักการซ้อนทับ	72

สารบัญ | บทที่ 9-11

บทที่	เนื้อหา	หน้า
	9.4 พฤติกรรมของคลื่น	77
	9.4.1 การสะท้อนของคลื่น	77
	9.4.2 การหักเหของคลื่น	82
	9.4.3 การแทรกสอดของคลื่น	87
	9.4.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น	96
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	100
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9	102
10	**แสงเชิงคลื่น**	
	10.1 แนวคิดเกี่ยวกับแสงเชิงคลื่น	107
	10.2 การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่	109
	10.3 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว	126
	10.4 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติง	138
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	148
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 10	150
11	**แสงเชิงรังสี**	
	11.1 การสะท้อนและการหักเหของแสง	160
	11.1.1 การสะท้อนของแสง	160
	11.1.2 การหักเหของแสง	165
	11.2 การมองเห็นและการเกิดภาพ	178
	11.2.1 การมองเห็น	178
	11.2.2 การเกิดภาพ	179
	11.3 ภาพจากเลนส์บางและกระจกเงาทรงกลม	187
	11.3.1 การเกิดภาพจากเลนส์บาง	187
	11.3.2 การคำนวณเกี่ยวกับเลนส์บาง	198
	11.3.3 การเกิดภาพจากกระจกเงาทรงกลม	205
	11.3.4 การคำนวณเกี่ยวกับกระจกเงาทรงกลม	212

สารบัญ | บทที่ 11-ภาคผนวก

บทที่	เนื้อหา	หน้า
	11.4 แสงสีและการมองเห็นแสงสี	218
	11.4.1 การมองเห็นสีของมนุษย์	218
	11.4.2 การผสมแสงสี	220
	11.4.3 แผ่นกรองแสงและสีของวัตถุ	223
	11.4.4 การผสมสารสี	226
	11.5 การอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติและการใช้ประโยชน์เกี่ยวกับแสง	228
	11.5.1 ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกี่ยวกับแสง	228
	11.5.2 การนำความรู้เรื่องกระจกเงาและเลนส์บางไปใช้ประโยชน์	235
	สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน	244
	แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 11	247
ภาคผนวก	**ภาคผนวก ก** คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์	262
	ภาคผนวก ข ระบบหน่วยระหว่างชาติ	272
	ภาคผนวก ค ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ	275
	ภาคผนวก ง ตารางเลขกำลังสอง รากที่สองและส่วนกลับ	276
	ภาคผนวก จ ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง	277
	ภาคผนวก ฉ ลอการิทึม	280
	คำศัพท์	283
	บรรณานุกรม	285
	ที่มาของรูป	286
	คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียน	287
	คำอธิบายรายวิชาเพิ่มเติม	290

บทที่ 8 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

ipst.me/8887

การเคลื่อนที่กลับไปกลับมาของลูกตุ้มนาฬิกาที่ใช้บอกเวลาหรือใช้หาค่าความเร่งเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกได้ รวมทั้งการแกว่งของชิงช้า เราสามารถอธิบายแรงและลักษณะการเคลื่อนที่ของวัตถุในสถานการณ์เหล่านี้ได้อย่างไร และความเข้าใจในเรื่องเหล่านี้ จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร

คำถามสำคัญ

- การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีลักษณะอย่างไร
- การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันอย่างไรบ้าง

จุดประสงค์การเรียนรู้

8.1 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

1. อธิบายลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

8.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

2. อธิบายการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของวัตถุที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย
3. คำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

8.3 แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มอย่างง่าย

4. อธิบายผลของแรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย
5. ทดลองการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของรถทดลองติดปลายสปริง
6. ทดลองการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย
7. คำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องกับคาบการสั่นของมวลติดปลายสปริงและการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย

8.4 ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้อง

8. อธิบายความถี่ธรรมชาติของวัตถุและการเกิดการสั่นพ้อง

ความรู้ก่อนเรียน

การเคลื่อนที่แนวตรง การเคลื่อนที่แบบวงกลม กฎการเคลื่อนที่ข้อสองของนิวตัน เวกเตอร์

การโคจรของดาวเทียมรอบโลก การแกว่งของลูกตุ้มนาฬิกาโบราณ การสั่นของแผ่นไดอะแฟรมลำโพง การสั่นของสายกีตาร์ การสั่นของมวลติดปลายสปริง สถานการณ์เหล่านี้เป็นการเคลื่อนที่เป็นคาบ โดยวัตถุจะเคลื่อนที่ตามเส้นทางเดิมกลับมาที่เริ่มต้นซ้ำแล้วซ้ำอีก โดยเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบรอบมีค่าคงตัว ความเข้าใจเรื่องการเคลื่อนที่เป็นคาบ เป็นพื้นฐานสำคัญต่อการศึกษาเรื่อง คลื่น เสียง แสง และไฟฟ้ากระแสสลับ

การโคจรของดาวเทียมรอบโลก การสั่นของมวลติดปลายสปริง การเคลื่อนที่ข้างต้นเป็นการเคลื่อนที่เป็นคาบเหมือนกัน โดยดาวเทียมจะเคลื่อนที่วนกลับมาที่ตำแหน่งเดิม ส่วนมวลติดสปริงเคลื่อนที่กลับไปกลับมาผ่านตำแหน่งกึ่งกลาง เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า **การสั่น** (vibration) หรือ **การแกว่งกวัด** (oscillation) ทั้งสองคำนี้หมายถึงการเคลื่อนที่เดียวกัน ในบทนี้เน้นการเข้าใจการสั่นแบบที่ง่ายที่สุด เรียกว่า **การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย** (simple harmonic motion)

8.1 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

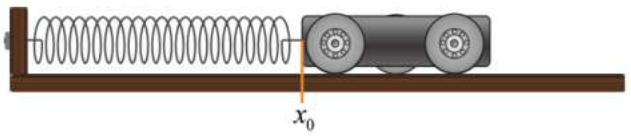
พิจารณาการเคลื่อนที่ของรถทดลองติดปลายสปริงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังรูปต่อไปนี้

รถทดลองติดปลายสปริงวางอยู่บนพื้นล้อของรถทดลองหมุนคล่อง ซึ่งประมาณได้ว่าแรงเสียดทานไม่มีผลต่อการเคลื่อนที่ของรถทดลอง ให้ตำแหน่ง x_0 รถทดลองอยู่นิ่งสปริงไม่ยืดตัวและไม่หดตัว เรียกตำแหน่งนี้ว่า **ตำแหน่งสมดุล** (equilibrium position) ดังรูป 8.1 ก.

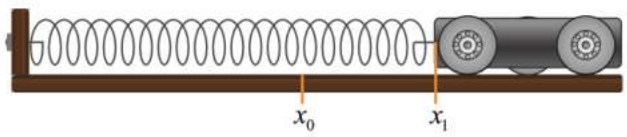
ดึงรถทดลองให้เคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลไปทางขวาที่ตำแหน่ง x_1 ดังรูป 8.1 ข. และให้ตำแหน่งนี้เป็นตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลา $t = t_0$

ปล่อยมือให้รถทดลองเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งไปทางซ้าย ผ่านตำแหน่งสมดุล โดยขณะผ่านตำแหน่งสมดุลรถทดลองมีอัตราเร็วสูงสุด จนกระทั่งที่เวลา $t = t_1$ รถทดลองมีอัตราเร็วเป็นศูนย์ที่ตำแหน่ง x_2 และกำลังจะเคลื่อนที่กลับมาทางด้านขวา ดังรูป 8.1 ค.

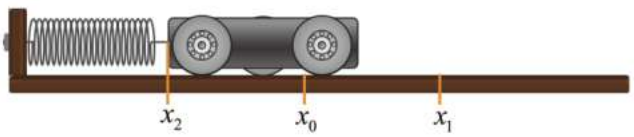
รถทดลองเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลา $t = t_2$ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ดังรูป 8.1 ง.



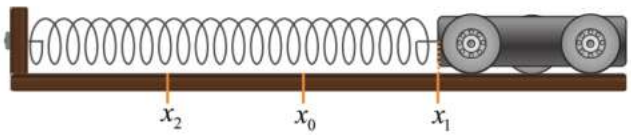
ก. รถทดลองติดปลายสปริงและอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล x_0



ข. ตำแหน่งรถทดลองที่เวลา $t = t_0$



ค. ตำแหน่งรถทดลองที่เวลา $t = t_1$



ง. ตำแหน่งรถทดลองที่เวลา $t = t_2$

รูป 8.1 ตำแหน่งรถทดลองที่เวลาต่าง ๆ

เวลาที่รถทดลองใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นจนกลับมาถึงตำแหน่งเดิมเป็นเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ เรียกว่า **คาบ** (period) แทนด้วย T ซึ่งพิจารณา **ความถี่** (frequency) ของการเคลื่อนที่ได้จาก $f = \frac{1}{T}$

ขณะรถทดลองอยู่ที่ตำแหน่งใด ๆ $x = x_i$ สามารถบอกการกระจัดของรถทดลองอ้างอิงกับตำแหน่งสมดุล ($x = x_0 = 0$) โดยเขียน**เวกเตอร์บอกตำแหน่ง** (position vector) ในหนึ่งมิติที่มีทิศทางจากตำแหน่งสมดุลไปยังตำแหน่งของรถทดลองขณะนั้น ๆ เรียกเวกเตอร์นี้ว่า **การกระจัด** (displacement) ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย แทนด้วย $\vec{x}$

จากรูป 8.1 ข. และ ค. ที่ตำแหน่ง x_1 และ x_2 เป็นตำแหน่งที่รถทดลองอยู่ห่างจากตำแหน่งสมดุลมากที่สุดหรือมีขนาดการกระจัดมากที่สุด เรียกขนาดการกระจัดสูงสุดนี้ว่า **แอมพลิจูด** (amplitude) แทนด้วย A

การเคลื่อนที่ของรถทดลองติดปลายสปริงที่กล่าวมาในข้างต้น เป็นการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำรอยเดิมผ่านตำแหน่งสมดุล โดยมีแอมพลิจูดและคาบคงตัว เรียกการเคลื่อนที่นี้ว่า **การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย**

จากการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของรถทดลองติดปลายสปริง พบว่าการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของรถทดลองเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ที่เวลาต่าง ๆ ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ปริมาณดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จะได้ศึกษาในหัวข้อถัดไป

ตัวอย่าง 8.1 วัตถุชิ้นหนึ่งติดที่ปลายสปริง มีตำแหน่งสมดุลที่ $x = 0$ ดึงวัตถุไปที่ตำแหน่ง $x = 0.1$ m จากตำแหน่งสมดุล แล้วปล่อยวัตถุพร้อมเริ่มจับเวลา พบว่าวัตถุเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่ง $x = 0.1$ m อีกครั้ง ใช้เวลา $t = 2.2$ s จงหา ก. แอมพลิจูด ข. คาบ ค. ความถี่

แนวคิด แอมพลิจูด (A) เป็นขนาดการกระจัดที่มากที่สุดและมีค่าเป็นบวก มีหน่วย เมตร คาบ (T) เป็นเวลาที่วัตถุใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ มีหน่วย วินาที และความถี่ (f) เป็นจำนวนรอบที่วัตถุเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา มีหน่วย ต่อวินาที หรือเฮิรตซ์

วิธีทำ ก. วัตถุมีขนาดการกระจัดที่มากที่สุด 0.1 m จากตำแหน่งสมดุล
ดังนั้นแอมพลิจูดเท่ากับ 0.1 m
ข. วัตถุใช้เวลา 2.2 s ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ดังนั้นคาบเท่ากับ 2.2 s
ค. วัตถุเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบใช้เวลา 2.2 s
ดังนั้น ความถี่ $= \frac{1}{2.2\text{ s}} = 0.45\text{ s}^{-1} = 0.45\text{ Hz}$

ตอบ ก. แอมพลิจูดเท่ากับ 0.1 เมตร ข. คาบเท่ากับ 2.2 วินาที ค. ความถี่เท่ากับ 0.45 เฮิรตซ์

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 8.1

1. การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีลักษณะอย่างไร
2. จงอธิบายตำแหน่งสมดุล
3. การเคลื่อนที่แบบวงกลมของจุกยาง การแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย เป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายหรือไม่ เพราะเหตุใด

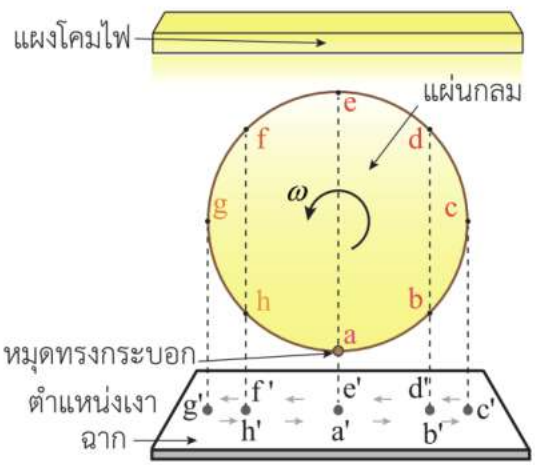
แบบฝึกหัด 8.1

1. ถ้าอนุภาคสั่นครบ 20 รอบ ในเวลา 40 วินาที จงหาความถี่และคาบการสั่นของอนุภาค
2. จงหาคาบต่อไปนี้ (ในหน่วยวินาที)
   ก. ชีพจรเต้น 29 ครั้ง ใน 20 วินาที
   ข. เครื่องยนต์หมุน 3200 รอบต่อนาที
3. จงหาความถี่ของเหตุการณ์ต่อไปนี้ (ในหน่วยต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์)
   ก. สายซอสั่น 43 รอบ ใน 0.1 วินาที
   ข. ใบพัดเครื่องปั่นอาหารหมุน 13 000 รอบ ใน 1 นาที
4. คันเคาะเครื่องเคาะสัญญาณเวลาทำให้เกิดจุดบนแถบกระดาษ 1200 จุด ใน 1 นาที คาบและความถี่ของคันเคาะมีค่าเท่าใด (ในหน่วยวินาที และต่อวินาทีหรือเฮิรตซ์ ตามลำดับ)

8.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

แผ่นกลมรัศมี A มีหมุดทรงกระบอกติดอยู่ที่ขอบกำลังหมุนด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω ทำให้หมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี A ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω เช่นเดียวกับแผ่นกลม แผงโคมไฟฉายแสงในแนวดิ่งทำให้เกิดเงาบนฉากด้านล่าง

พิจารณาหมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่จาก a ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้น ไป b ไป c...และกลับมาที่ a ทำให้เกิดเงาของหมุดบนฉากด้านล่างในแนวระดับ โดยเงาเคลื่อนที่กลับไปกลับมาในแนวตรงจาก a′ ไป b′ ไป c′... และกลับมาที่ a′ ตามลำดับ ดังรูป 8.2 จะพบว่าเงามีการเคลื่อนที่กลับไปกลับมาซ้ำรอยเดิม มีคาบและแอมพลิจูดคงตัว ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยมีตำแหน่ง a′หรือ e′ เป็นตำแหน่งสมดุล จะสามารถหาการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของวัตถุเป็นฟังก์ชันกับเวลาได้ดังนี้



รูป 8.2 เงาของหมุดที่ตำแหน่งต่าง ๆ

8.2.1 การกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

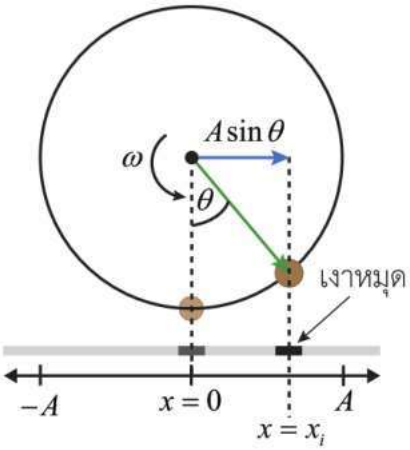
พิจารณาการเคลื่อนที่ของหมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่เป็นวงกลมด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงตัว ω เมื่อเวลาใด ๆ (t) แผ่นกลมหมุนไปเป็นมุม θ เงา ของหมุด มีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น $x = 0$ ไปยังตำแหน่งใด ๆ (x_i) ดังรูป 8.3 เงาจะเคลื่อนที่ด้วยความถี่เชิงมุมเท่ากับอัตราเร็วเชิงมุมของหมุด ω การกระจัดของเงาเท่ากับ

$$x = A\sin\theta$$

จาก $\theta = \omega t$ จะได้

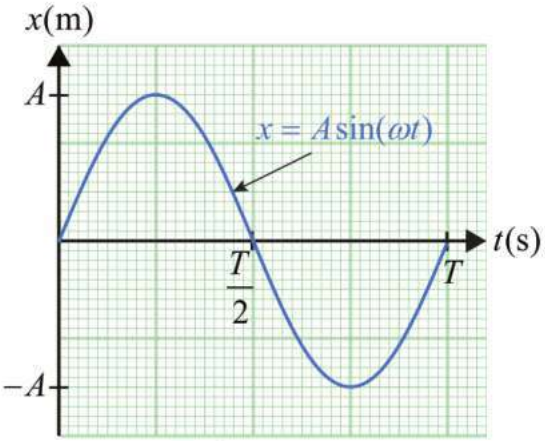
$$x = A\sin\omega t \qquad (8.1)$$

การกระจัดมีทิศทางไปทางขวา



รูป 8.3 เปรียบเทียบตำแหน่งของหมุดกับการกระจัดของเงา

จากสมการ (8.1) การกระจัดกับเวลาของเงามีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันแบบไซน์ เขียนกราฟความสัมพันธ์ของการกระจัดของเงากับเวลา เมื่อเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ได้ดังรูป 8.4



รูป 8.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดของเงากับเวลา

ข้อสังเกต

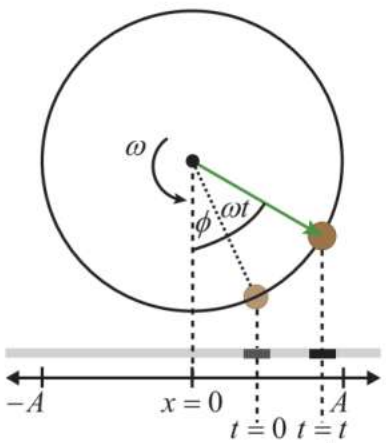
อัตราเร็วเชิงมุมกับความถี่เชิงมุม

อัตราเร็วเชิงมุม

กรณีวัตถุเคลื่อนที่ไปบนเส้นรอบวงวงกลมในช่วงเวลา Δt วัตถุจะมีการกระจัดเชิงมุม $\Delta\theta$ สามารถหา**อัตราเร็วเชิงมุม** (angular speed) ได้จากความสัมพันธ์ $\omega = \dfrac{\Delta\theta}{\Delta t}$ เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ $\Delta t = T$ จะได้ $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$ และ $\omega = 2\pi f$

ความถี่เชิงมุม

กรณีเงาของหมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ในช่วงเวลา Δt จะไม่ปรากฏมุม $\Delta\theta$ จึงไม่สามารถหา ω ได้จาก $\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta t}$ อย่างไรก็ตามสามารถหา ω ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายได้จากความสัมพันธ์ $\omega = 2\pi f$ ดังนั้นในกรณีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายจะเรียก ω ว่า **ความถี่เชิงมุม** (angular frequency) มีหน่วยเป็น rad/s ในกรณีเป็นความสัมพันธ์กับปริมาณเชิงมุมจะใช้ rad/s ส่วนกรณีที่สัมพันธ์กับปริมาณเชิงเส้นจะใช้เป็น s^{-1}



รูป 8.5 ตำแหน่งหมุดทรงกระบอกที่เวลา $t = 0$ เฟสเริ่มต้นเท่ากับ ϕ และที่เวลา t ใด ๆ มุมเฟสเท่ากับ $\phi + \omega t$

กรณีทั่วไป ตำแหน่งเริ่มต้น ($t = 0$) หมุดทรงกระบอกเคลื่อนที่จากจุด a ไปแล้วเป็นมุม ϕ เงาของหมุดไม่ได้อยู่ที่ตำแหน่งสมดุล ($x = 0$) เรียกมุม ϕ ว่า **เฟสเริ่มต้น**ของเงา เมื่อเวลาผ่านไป t หมุดเคลื่อนที่ต่อไปจนเป็นมุม $\phi + \omega t$ ซึ่งเรียกว่า **มุมเฟส** (phase angle) ของเงาขณะนั้น ดังสมการ

$$\theta(t) = \phi + \omega t$$

เขียนสมการความสัมพันธ์การกระจัดของเงาที่ขึ้นกับเวลา ในรูปทั่วไปได้เป็น

$$x = A\sin(\omega t + \phi) \qquad (8.2)$$

เมื่อ ϕ คือ เฟสเริ่มต้นหรือมุมเริ่มต้นที่เวลา $t = 0$

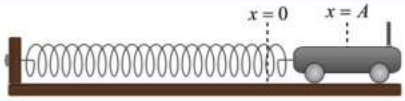
สมการ (8.2) สามารถนำไปใช้อธิบายการกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของวัตถุเป็นฟังก์ชันของเวลา

ข้อสังเกต

หน่วยของมุมเฟส

ในระบบเอสไอ มุมมีหน่วยเป็น **เรเดียน** (radian) เช่น มุม π เรเดียน มีค่าเท่ากับมุม 180 องศา มุม 2π เรเดียน มีค่าเท่ากับ มุม 360 องศา

ตัวอย่าง 8.2 จงเขียนสมการการกระจัดที่ขึ้นกับเวลาของรถทดลองติดปลายสปริงที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีตำแหน่งเริ่มต้นที่เวลาต่างกันในตาราง กำหนดให้ ความถี่เชิงมุมเท่ากับ ω แอมพลิจูดเท่ากับ A

รูปแสดงตำแหน่งเริ่มต้นที่ $t=0$		เฟสเริ่มต้น (ϕ)	สมการการกระจัด
ก.			
ข.			

แนวคิด หาเฟสเริ่มต้น ด้วยการแทนค่า $t=0$ และการกระจัดที่เวลาเริ่มต้นในสมการ $x = A\sin(\omega t+\phi)$ จะได้ค่า ϕ ที่เวลาเริ่มต้น

วิธีทำ ก. จากตาราง เมื่อ $t=0$ การกระจัดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $x=0$ จะได้

$$0 = A\sin(\omega(0)+\phi)$$

$$0 = \sin(\phi)$$

จาก $\sin(0)=0$ จะได้ว่า $\phi = 0$

ข. จากตาราง เมื่อ $t=0$ การกระจัดที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ $x=A$ จะได้

$$A = A\sin(\omega(0)+\phi)$$

$$1 = \sin(\phi)$$

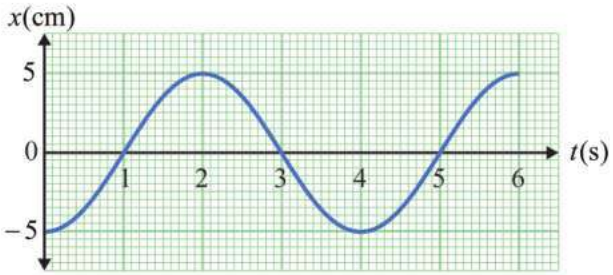
จาก $\sin\left(\frac{\pi}{2}\right)=1$ จะได้ว่า $\phi = \frac{\pi}{2}$

เขียนสมการการกระจัดได้เป็น $x = A\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$

ตอบ ก. เฟสเริ่มต้น $\phi = 0$ สมการการกระจัด $x = A\sin(\omega t)$

ข. เฟสเริ่มต้น $\phi = \frac{\pi}{2}$ สมการการกระจัด $x = A\sin\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)$

ตัวอย่าง 8.3 วัตถุชิ้นหนึ่งที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายบนพื้นราบแนวระดับ กราฟระหว่างการกระจัดกับเวลาเป็นดังรูป



รูป ประกอบตัวอย่าง 8.3

ก. การกระจัดของวัตถุเป็นศูนย์ ที่เวลาใด

ข. ที่เวลา $t = 2.5$ s การกระจัดของวัตถุมีค่าเท่าใด

ค. ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดเป็นเท่าใด

ง. ความเร็วของวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ ที่เวลาใด

แนวคิด กราฟระหว่างการกระจัดกับเวลาของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย เป็นกราฟที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับการกระจัดของวัตถุที่เวลาต่าง ๆ นอกจากนี้ยังใช้หาคาบ ความถี่ ระยะทาง รวมทั้งความเร็วจากความชันได้อีกด้วย

วิธีทำ ก. จากกราฟ การกระจัดมีค่าเป็น 0 ที่เวลา $t = 1$ s $t = 3$ s และ $t = 5$ s

ข. จากกราฟ ที่ $t = 2.5$ s การกระจัด (x) มีค่า 3.5 cm ดังนั้นการกระจัดของวัตถุมีค่า 3.5 cm

ค. ระยะทางระหว่างตำแหน่งสมดุลและตำแหน่งที่ขนาดการกระจัดสูงสุดเท่ากับ 5.0 cm ใช้เวลาเคลื่อนที่ 6 s ดังนั้นระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดเท่ากับ 30.0 cm

ง. ที่ $t = 0$, $t = 2$ s, $t = 4$ s และ $t = 6$ s ความชันของกราฟเป็น 0 ดังนั้น วัตถุมีความเร็วเป็นศูนย์ที่เวลา 0, 2 s, 4 s และ 6 s

ตอบ ก. การกระจัดของวัตถุเป็นศูนย์ ที่เวลา 1 วินาที 3 วินาที และ 5 วินาที

ข. การกระจัดของวัตถุมีค่า 3.5 เซนติเมตร

ค. ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ทั้งหมดเท่ากับ 30.0 เซนติเมตร

ง. ความเร็วของวัตถุมีค่าเป็นศูนย์ที่เวลา 0 วินาที 2 วินาที 4 วินาที และ 6 วินาที

ตัวอย่าง 8.4 อนุภาคหนึ่งมีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีการกระจัดเป็น $x = (0.10\ \text{m})\sin(\pi t)$

ก. จากสมการในโจทย์ จงระบุ มุมเฟส เฟสเริ่มต้น ความถี่เชิงมุม และแอมพลิจูด

ข. ที่เวลา $t = 1.0$ วินาที มุมเฟสและการกระจัดของอนุภาคมีค่าเท่าใด

แนวคิด สมการการกระจัดของอนุภาค $x = A\sin(\omega t + \phi)$ มี A เป็นแอมพลิจูด ω เป็นความถี่เชิงมุม $\omega t + \phi$ เป็นมุมเฟส และ ϕ เป็นเฟสเริ่มต้น เมื่อแทนค่าปริมาณต่าง ๆ ในสมการการกระจัด จะหาค่าของ x ซึ่งเป็นการกระจัดของอนุภาคได้

วิธีทำ ก. เปรียบเทียบสมการ $x=(0.10\text{ m})\sin(\pi t)$ กับ $x=A\sin(\omega t+\phi)$ จะได้

มุมเฟส	πt
เฟสเริ่มต้น	0
ความถี่เชิงมุม	π rad/s
แอมพลิจูด	0.10 m

ข. ที่เวลา $t=1.0$ s

$$\text{มุมเฟส}=(\pi\text{ rad s}^{-1})(1.0\text{ s})=\pi\text{ rad}$$

การกระจัดของอนุภาค

$$\begin{aligned}x&=(0.10\text{ m})\sin(\pi t)\\&=(0.10\text{ m})\sin(\pi)\\&=0\end{aligned}$$

ตอบ ก. πt เรเดียน, 0, π เรเดียนต่อวินาที และ 0.1 เมตร ตามลำดับ

ข. มุมเฟสและการกระจัดของอนุภาคมีค่า π เรเดียน และ 0 ตามลำดับ

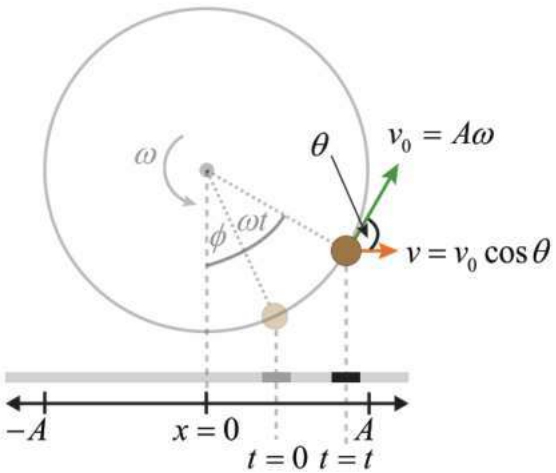
8.2.2 ความเร็วและความเร่งของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

ความเร็วของเงาหาได้จากองค์ประกอบความเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบวงกลมด้วยอัตราเร็ว v_0 ได้ดังรูป 8.6 ขณะเวลาใด ๆ (t) ความเร็วของเงาเท่ากับความเร็วตามแนวระดับของหมุด หาได้จาก

$$v=v_0\cos\theta$$

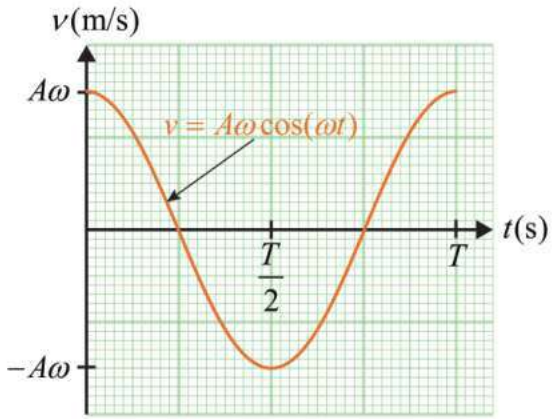
จาก $\theta=\omega t+\phi$ และ $v_0=A\omega$ จะได้

$$v=A\omega\cos(\omega t+\phi) \qquad (8.3)$$



รูป 8.6 เปรียบเทียบความเร็วของหมุดกับความเร็วของเงา

จากสมการ (8.3) ความเร็วกับเวลาของการเคลื่อนที่ของเงามีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันแบบโคไซน์ เมื่อ $\phi=0$ เขียนกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วกับเวลาของเงาที่เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบได้ดังรูป 8.7



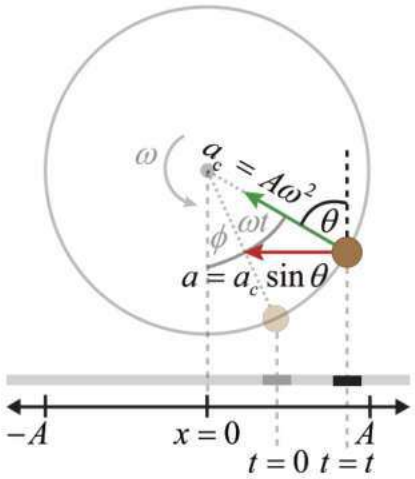
รูป 8.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา

ความเร่งของเงาหาได้จากความเร่งในแนวระดับของหมุด โดยที่ขนาดความเร่งของเงาเท่ากับขนาดความเร่งในแนวระดับของหมุดแต่มีทิศตรงข้ามกับการกระจัด ดังรูป 8.8 ขณะเวลาใด ๆ (t) ความเร่งของเงาหาได้จาก

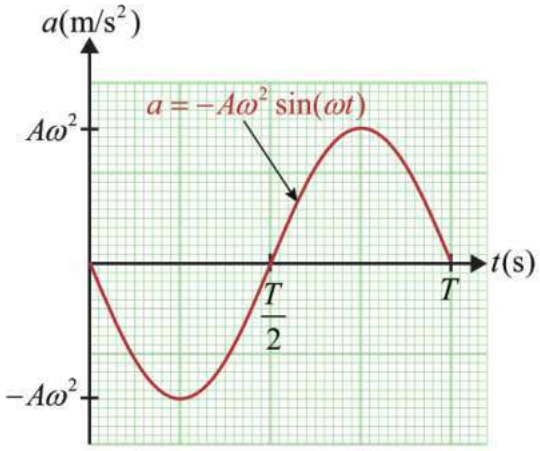
$$a = -a_c \sin\theta$$

จาก $\theta = \omega t + \phi$ และ $a_c = A\omega^2$ จะได้

$$a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \qquad (8.4)$$



รูป 8.8 เปรียบเทียบความเร่งของหมุดกับความเร่งของเงา



รูป 8.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับเวลา

จากสมการ (8.4) ความเร่งกับเวลาของการเคลื่อนที่ของเงามีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันแบบไซน์ เมื่อ $\phi = 0$ เขียนกราฟความสัมพันธ์ของความเร่งกับเวลาของเงาที่เคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบได้ ดังรูป 8.9

สามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับการกระจัดของเงาที่คลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายได้ โดยแทนค่าการกระจัดจากสมการ (8.2) ในสมการ (8.4) จะได้สมการความสัมพันธ์ของความเร่งกับการกระจัดตามสมการ

$$a = -\omega^2 x \qquad (8.5)$$

เนื่องจากความถี่เชิงมุม ω คงตัว จากสมการ (8.5) จะได้ว่า**ขนาดของความเร่งแปรผันตรงกับขนาดของการกระจัด แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน** สมการ (8.2) (8.3) และ (8.4) จะใช้อธิบายการกระจัด ความเร็ว และความเร่งของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายเป็นฟังก์ชันกับเวลา

ตัวอย่าง 8.5 จากตัวอย่าง 8.4 อนุภาคมีการกระจัดเป็น $x=(0.10\,\text{m})\sin(\pi\,\text{t})$ สมการความเร็วของอนุภาคเป็นอย่างไร และที่เวลา $t=1.0$ วินาที ความเร็วของอนุภาคมีค่าเท่าใด

แนวคิด วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีความเร็วดังสมการ $v=A\omega\cos(\omega t+\phi)$ เมื่อแทนค่าปริมาณต่าง ๆ ในสมการความเร็ว จะหาค่าของ v ซึ่งเป็นความเร็วของอนุภาคที่เวลาต่าง ๆ ได้

วิธีทำ อนุภาคมีแอมพลิจูด $A=0.10$ m ความถี่เชิงมุม $\omega=\pi\ \text{s}^{-1}$ และเฟสเริ่มต้น $\phi=0$ แทนปริมาณเหล่านี้ใน $v=A\omega\cos(\omega t+\phi)$ จะได้

$$\begin{aligned} v&=(0.10\,\text{m})(\pi\,\text{s}^{-1})\cos(\pi t)\\ &=(0.10\pi)\cos(\pi t)\,\text{m s}^{-1} \end{aligned}$$

ที่เวลา $t=1.0$ s จะได้

$$\begin{aligned} v&=(0.10\pi\,\text{m s}^{-1})\cos\big((\pi\,\text{s}^{-1})(1.0\,\text{s})\big)\\ &=(0.10\pi\,\text{m s}^{-1})\cos(\pi)\\ &=(0.10\pi\,\text{m s}^{-1})(-1)\\ &=-0.10\pi\,\text{m s}^{-1} \end{aligned}$$

ตอบ สมการความเร็ว $v=(0.10\pi)\cos(\pi t)$ เมตรต่อวินาที และความเร็วที่เวลา $t=1.0$ วินาที เท่ากับ -0.1π เมตรต่อวินาที

ตัวอย่าง 8.6 จากตัวอย่าง 8.4 สมการความเร่งของอนุภาค เป็นอย่างไร และที่เวลา $t=1.0$ วินาที ความเร่งของอนุภาคมีค่าเท่าใด

แนวคิด วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีความเร่งดังสมการ $a=-A\omega^2\sin(\omega t+\phi)$ เมื่อแทนค่าปริมาณต่าง ๆ ในสมการความเร่ง จะหาค่าของ a ซึ่งเป็นความเร่งของอนุภาคที่เวลาต่าง ๆ ได้

วิธีทำ อนุภาคมีแอมพลิจูด $A=0.10$ m ความถี่เชิงมุม $\omega=\pi\ \text{s}^{-1}$ และเฟสเริ่มต้น $\phi=0$ แทนปริมาณเหล่านี้ใน $a=-A\omega^2\sin(\omega t+\phi)$ จะได้

$$\begin{aligned} a&=-(0.10\,\text{m})(\pi\,\text{s}^{-1})^2\sin(\pi t)\\ &=-(0.10\pi^2)\sin(\pi t)\,\text{m s}^{-2} \end{aligned}$$

ที่เวลา $t=1.0$ s จะได้

$$\begin{aligned} a&=-(0.10\pi^2\,\text{m s}^{-2})\sin\big((\pi\,\text{s}^{-1})(1.0\,\text{s})\big)\\ &=-(0.10\pi^2\,\text{m s}^{-2})\sin(\pi)\\ &=-(0.10\pi^2\,\text{m s}^{-2})(0)\\ &=0 \end{aligned}$$

ตอบ สมการความเร่ง $a=-(0.10\pi^2)\sin(\pi t)$ เมตรต่อวินาที^{2} และที่เวลา $t=1.0$ วินาที ความเร่งของอนุภาคมีค่าเท่ากับศูนย์

ตัวอย่าง 8.7 วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีความถี่ 2 รอบต่อวินาที ณ ตำแหน่งที่มีการกระจัด 7 เซนติเมตร วัตถุจะมีความเร่งเท่าใด

แนวคิด ความเร่งของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ณ ตำแหน่งใด ๆ หาได้จากสมการ $a = -\omega^2 x$

วิธีทำ หาความเร่งของวัตถุได้จาก

$$\begin{aligned} a &= -\omega^2 x \\ &= -(2\pi f)^2 x \\ &= -(4)(3.1416)^2(4\ \mathrm{s^{-2}})(7\times10^{-2}\ \mathrm{m}) \\ &= -11\ \mathrm{m/s^2} \end{aligned}$$

ตอบ วัตถุมีขนาดความเร่งเท่ากับ 11 เมตรต่อวินาที^{2}

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าความเร่งมีความสัมพันธ์กับการกระจัด ทำนองเดียวกันสามารถพิจารณาความเร็วสัมพันธ์กับการกระจัดได้ดังนี้ ความสัมพันธ์ของความเร็วเงากับการกระจัดของเงาที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายหาได้จากการนำค่า $\sin(\omega t+\phi) = \dfrac{x}{A}$ จากสมการ (8.2) และ $\cos(\omega t+\phi) = \dfrac{v}{\omega A}$ จากสมการ (8.3) มายกกำลังสองแล้วบวกกัน จะได้

$$\sin^2(\omega t+\phi) + \cos^2(\omega t+\phi) = \frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{A^2\omega^2}$$

$$1 = \frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{A^2\omega^2}$$

$$v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2} \qquad (8.6)$$

สำหรับเครื่องหมาย $\pm$ ในสมการ (8.6) แสดงถึงทิศความเร็วของวัตถุที่เคลื่อนที่ในหนึ่งมิติ เช่น ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ วัตถุอยู่ที่ $x = 0$ ความเร็วมีค่าเป็นบวก แสดงว่าวัตถุติดปลายสปริงเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุลไปทางขวา ในทางกลับกันความเร็วมีค่าเป็นลบแสดงว่าวัตถุเคลื่อนที่ไปทางซ้าย

จากสมการ (8.3) ขนาดความเร็วมีค่าสูงสุดเมื่อ $|\cos(\omega t+\phi)|$ เท่ากับหนึ่ง ดังนั้นจะเรียกว่าขนาดความเร็วสูงสุดหรือ $v_{\max} = A\omega$ พิจารณาคล้ายกันกับสมการ (8.4) ที่แสดงขนาดความเร่งจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $|\sin(\omega t+\phi)|$ เท่ากับ 1 แทนค่าขนาดความเร่งสูงสุดเป็น $a_{\max} = A\omega^2$ ดังนั้นสมการ (8.3) และ (8.4) เขียนได้เป็น

$$v = v_{\max}\cos(\omega t+\phi) \qquad (8.7)$$

$$a = -a_{\max}\sin(\omega t+\phi) \qquad (8.8)$$

ตัวอย่าง 8.8 วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายรอบตำแหน่งสมดุล โดยมีความถี่เชิงมุม 0.4 เรเดียนต่อวินาที และขนาดการกระจัดสูงสุด 10 เซนติเมตร ขณะที่วัตถุอยู่ห่างจากตำแหน่งสมดุลเป็นระยะทาง 8 เซนติเมตร วัตถุมีอัตราเร็วเท่าใด

แนวคิด อัตราเร็วของวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ณ ตำแหน่งใด ๆ หาได้จากสมการ $v = \omega\sqrt{A^2 - x^2}$

วิธีทำ จากโจทย์ $\omega = 0.4\ \text{s}^{-1}$, A=10 cm และ $x = 8$ cm

แทนค่า $v = (0.4\ \text{s}^{-1})\sqrt{(10\,\text{cm})^2 - (8\,\text{cm})^2}$

$= 2.4\,\text{cm/s}$

ตอบ วัตถุมีอัตราเร็วเท่ากับ 2.4 เซนติเมตรต่อวินาที

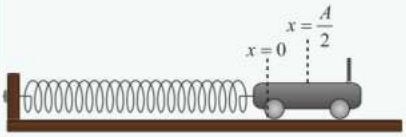
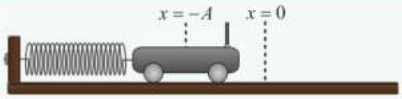
คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 8.2

1. กราฟระหว่างการกระจัดกับเวลาของวัตถุชิ้นหนึ่งที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ให้ข้อมูลอะไรบ้าง
2. จากกราฟในตัวอย่าง 8.3 จงบรรยายการเคลื่อนที่ของวัตถุ
3. ขณะที่วัตถุสั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ปริมาณใดที่มีทิศทางตรงข้ามกันเสมอ
4. วัตถุที่สั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายโดยมีแอมพลิจูดเท่ากับ A วัตถุจะเคลื่อนที่ได้ระยะทางเท่าใดในเวลา 1 คาบ
5. จงอธิบายปริมาณต่าง ๆ ในสมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย $x = A\sin(\omega t + \phi)$
6. มุมเฟสและเฟสเริ่มต้น ต่างกันอย่างไร และมีความสำคัญอย่างไร

แบบฝึกหัด 8.2

1. วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีแอมพลิจูด 30 เซนติเมตร มีคาบการเคลื่อนที่ 4 วินาที อัตราเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่มีค่าเท่าใด
2. วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายด้วยความถี่ 30 รอบต่อนาที มีขนาดการกระจัดสูงสุด 20 เซนติเมตร ขนาดความเร่งสูงสุดของวัตถุนี้มีค่าเท่าใด

3. จงเขียนสมการการกระจัดที่ขึ้นกับเวลาของวัตถุติดปลายสปริงที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีตำแหน่งเริ่มต้นต่างกันในตาราง กำหนดให้ ความถี่เชิงมุมเท่ากับ ω แอมพลิจูดเท่ากับ A

	รูปแสดงตำแหน่งเริ่มต้นที่ $t = 0$	เฟสเริ่มต้น (ϕ)	สมการการกระจัด
ก.			
ข.			

4. วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ด้วยความถี่ 5 รอบต่อวินาที
   ก. เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที วัตถุอยู่ในมุมเฟสต่างจากเดิมเท่าใด
   ข. เมื่อวัตถุอยู่ในมุมเฟสต่างจากเดิม $\frac{21\pi}{2}$ เรเดียน วัตถุเคลื่อนที่ได้กี่รอบ
   ค. วัตถุใช้เวลาเท่าใด จึงจะอยู่ในมุมเฟสต่างไปจากเดิม 4π เรเดียน
5. วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายรอบจุดสมดุล O โดยมีอัตราเร็วสูงสุด 5.0 เซนติเมตรต่อวินาที และมีคาบการสั่นเท่ากับ 4π วินาที ขณะที่วัตถุมีอัตราเร็ว 3.0 เซนติเมตรต่อวินาที วัตถุอยู่ห่างจากจุดสมดุล O เป็นระยะกี่เซนติเมตร

8.3 แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มอย่างง่าย

เราทราบแล้วว่า การสั่น หรือการแกว่งกวัด เป็นการเคลื่อนกลับไปกลับมาผ่านตำแหน่งสมดุล ในหัวข้อนี้จะได้ศึกษาการสั่นแบบที่ง่ายที่สุดที่เรียกว่า การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ได้แก่ การสั่นของวัตถุติดปลายสปริง และการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย เมื่อวัตถุเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลจะมีแรงดึงวัตถุกลับมายังตำแหน่งสมดุล ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้วัตถุเคลื่อนที่กลับไปมาซ้ำทางเดิมเรียกแรงนี้ว่า **แรงดึงกลับ** (restoring force) สัมพันธ์กับปริมาณอื่น ๆ ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายอย่างไร จะได้ศึกษาในหัวข้อนี้

8.3.1 การสั่นของมวลติดปลายสปริง

การสั่นของมวลติดปลายสปริงเป็นตัวอย่างหนึ่งของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ในหัวข้อนี้จะพิจารณาแรงที่กระทำต่อวัตถุติดปลายสปริง และศึกษาปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย จากกิจกรรม 8.1

กิจกรรม 8.1 การทดลองการเคลื่อนที่ของรถทดลองติดปลายสปริง

จุดประสงค์

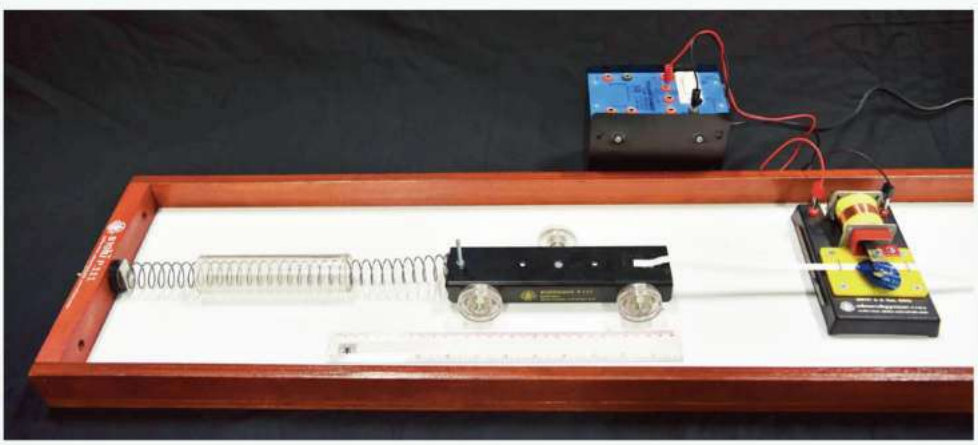
1. หาการกระจัดและความเร็วของรถทดลอง ซึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายในช่วงเวลาครึ่งคาบ
2. เขียนกราฟระหว่างการกระจัดกับเวลา และกราฟระหว่างความเร็วกับเวลาของการเคลื่อนที่ของรถทดลอง
3. อธิบายการกระจัดและความเร็วที่เวลาเดียวกันโดยพิจารณาจากกราฟในข้อ 2

วัสดุและอุปกรณ์

1. รถทดลอง มวล 500 กรัม	1 คัน
2. แท่งเหล็ก/แผ่นเหล็ก มวล 500 กรัม	1 แผ่น
3. ลวดสปริงพร้อมท่อ	1 ชุด
4. เครื่องเคาะสัญญาณเวลา	1 เครื่อง
5. หม้อแปลงโวลต์ต่ำ	1 เครื่อง
6. รางไม้	1 อัน
7. สายไฟ	1 คู่
8. แถบกระดาษ	1 แถบ

วิธีทำกิจกรรม

1. จัดอุปกรณ์ ดังรูป โดยตรึงปลายหนึ่งของลวดสปริงกับขอบรางไม้ อีกปลายหนึ่งของลวดสปริงยึดติดกับรถทดลอง แล้วยึดท่อให้ติดอยู่กับรางไม้ ติดแถบกระดาษกับรถทดลองแล้วสอดผ่านเครื่องเคาะสัญญาณเวลา



รูป การจัดอุปกรณ์การทดลอง

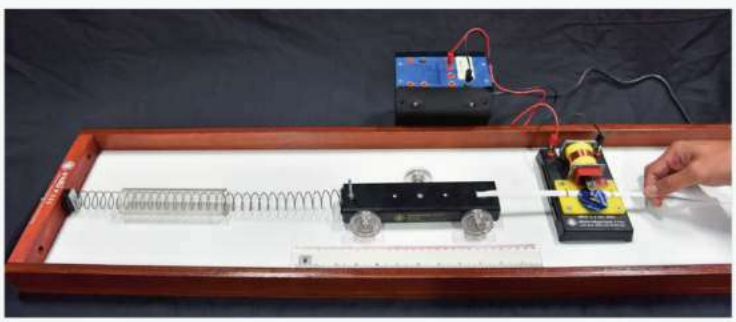
2. กดคันเคาะให้เกิดจุดบนแถบกระดาษแล้วทำเครื่องหมายแสดงตำแหน่งสมดุลตรงจุดดังกล่าวบนแถบกระดาษ ดังรูป

รูป ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งสมดุลบนแถบกระดาษ

3. ใช้ดินสอขีดเส้นบนรางไม้เพื่อกำหนดตำแหน่งสมดุลของรถทดลองและตำแหน่งที่ดึงรถทดลองออกห่างจากตำแหน่งสมดุล 6 เซนติเมตร ดังรูป

รูป ตัวอย่างการกำหนดตำแหน่งและตำแหน่งที่สปริงยืดออก 6 เซนติเมตร

4. ดึงรถทดลองออกห่างจากตำแหน่งสมดุล 6 เซนติเมตร ดังรูป จากนั้นกดสวิตช์ที่หม้อแปลงให้เครื่องเคาะสัญญาณเวลาทำงาน แล้วปล่อยมือให้รถทดลองเคลื่อนที่จนกระทั่งรถทดลองหยุดเคลื่อนที่และเริ่มเคลื่อนที่สวนกลับทางเดิม จึงปิดสวิตช์



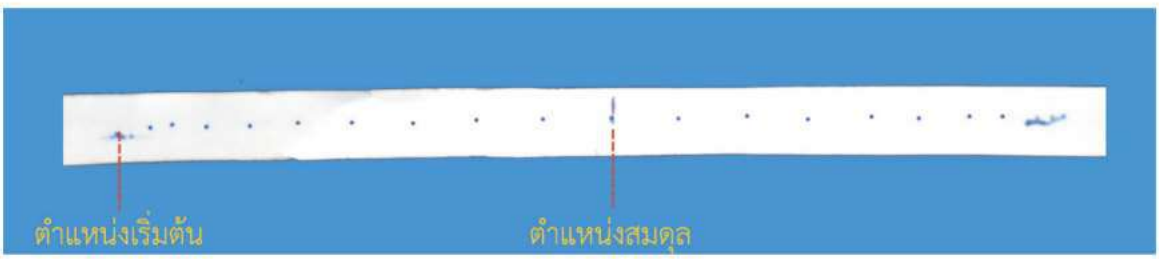
รูป การดึงรถทดลองออกจากตำแหน่งสมดุล

5. นำแถบกระดาษมาหาการกระจัดจากสมดุลของรถทดลอง และคำนวณหาความเร็วที่เวลาต่าง ๆ ตลอดการเคลื่อนที่ กำหนดให้ปริมาณที่มีทิศไปทางขวามีเครื่องหมายบวก และปริมาณที่มีทิศไปทางซ้ายมีเครื่องหมายลบ บันทึกผลในตาราง

6. เขียนกราฟระหว่างการกระจัดกับเวลา โดยให้เวลา (t) อยู่ในแกนนอนและการกระจัด (x) อยู่ในแกนตั้ง
7. เขียนกราฟระหว่างและความเร็วกับเวลา โดยให้เวลา (t) อยู่ในแกนนอนและความเร็ว (v) อยู่ในแกนตั้ง

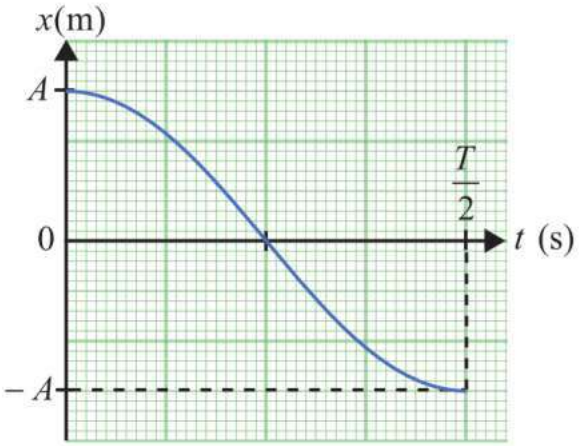
คำถามท้ายกิจกรรม

- □ กราฟการกระจัดกับเวลา และความเร็วกับเวลา มีลักษณะอย่างไร
- □ จากกราฟการกระจัดกับเวลา รถทดลองมีการกระจัดมากที่สุดและการกระจัดเป็นศูนย์ (สมดุล) ณ เวลาใด
- □ พิจารณากราฟการกระจัดกับเวลา เปรียบเทียบกับกราฟความเร็วกับเวลา
  1. ขณะการกระจัดเป็นศูนย์ ความเร็วของรถทดลองเป็นอย่างไร
  2. ขณะการกระจัดมากที่สุด ความเร็วของรถทดลองเป็นอย่างไร
- □ จากกราฟการกระจัดกับเวลาและกราฟความเร็วกับเวลาของรถทดลอง รถทดลองเคลื่อนที่ได้กี่รอบและใช้เวลาเท่าใด
- □ จากกราฟความเร็วกับเวลา ความชันของกราฟแทนปริมาณใด
- □ จากกราฟความเร็วกับเวลา ก่อนผ่านและหลังผ่านตำแหน่งสมดุล ความเร่งรถทดลองมีขนาดเปลี่ยนแปลงอย่างไรและมีทิศทางเทียบกับการกระจัดอย่างไร

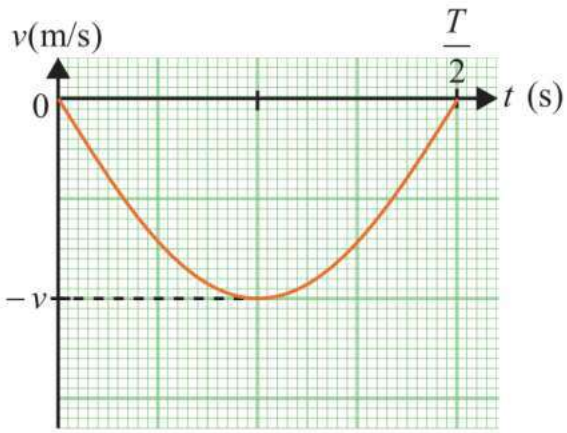


รูป 8.10 ตัวอย่างแถบกระดาษของรถทดลองติดปลายสปริง

จากกิจกรรม 8.1 พิจารณาแถบกระดาษในรูป 8.10 ระยะห่างของจุดบนแถบกระดาษจากตำแหน่งเริ่มต้นจุดมีระยะห่างเพิ่มขึ้น จนกระทั่งมีระยะห่างมากที่สุดที่ตำแหน่งสมดุล จากนั้นระยะห่างระหว่างจุดลดลงน้อยที่สุดเมื่อรถทดลองเคลื่อนที่ครบครึ่งรอบ เขียนกราฟการกระจัดกับเวลาและกราฟความเร็วกับเวลาของรถทดลองได้ดังรูป 8.11



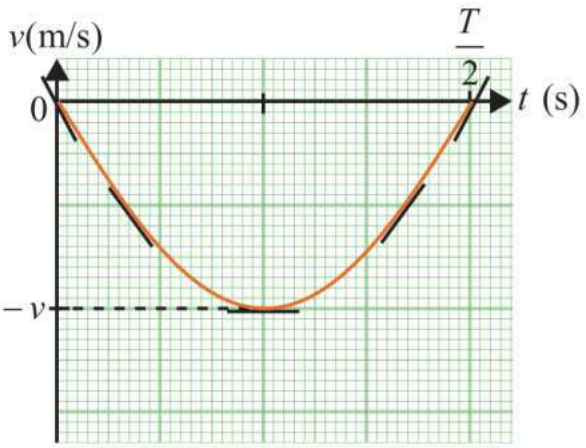
รูป 8.11 ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลา



รูป 8.11 ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับเวลา

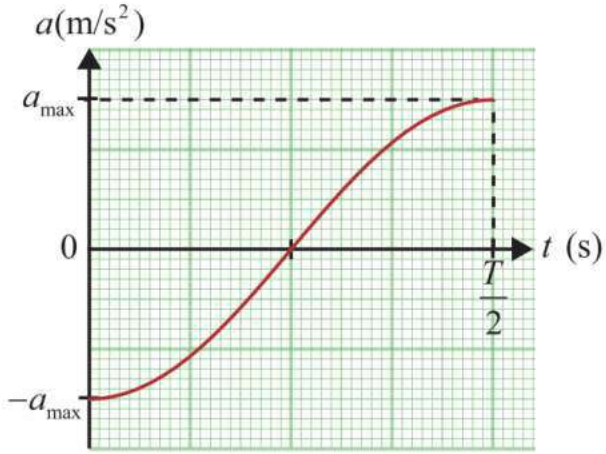
พิจารณากราฟการกระจัดกับเวลาและกราฟความเร็วกับเวลา ที่เวลา $t = 0$ รถทดลองอยู่นิ่งที่ตำแหน่งการกระจัดมากที่สุด หลังปล่อยมือรถทดลองเริ่มเคลื่อนที่ โดยมีความเร็วเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดที่ตำแหน่งสมดุล จากนั้นเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งสมดุลโดยมีความเร็วลดลงจนเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งการกระจัดมากที่สุดด้านตรงกันข้ามกับตำแหน่งเริ่มต้น

จากการวิเคราะห์ความเร็วที่เวลาต่าง ๆ พบว่าความเร็วของรถทดลองไม่คงตัวหรือรถทดลองเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง สามารถหาความเร่งที่เวลาต่าง ๆ ได้โดยการลากเส้นสัมผัสกราฟความเร็วกับเวลาที่ขณะต่าง ๆ ดังรูป 8.12

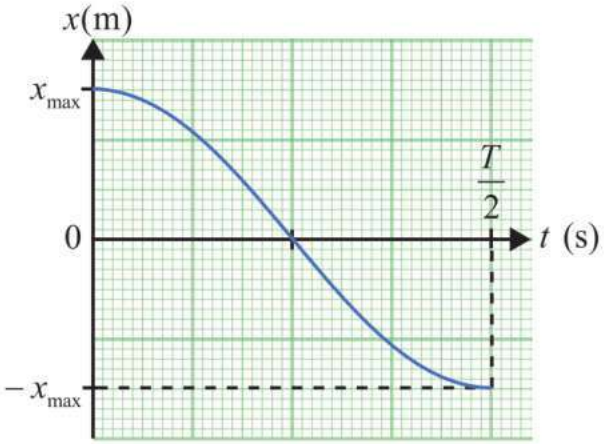


รูป 8.12 เส้นสัมผัสกราฟความเร็วกับเวลาที่เวลาต่าง ๆ

พิจารณาความชันของเส้นสัมผัสกราฟจะพบว่าความชันมีค่าเป็นลบมากที่สุดที่ตำแหน่งเริ่มต้น และเป็นลบน้อยลงจนมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งสมดุล จากนั้นมีค่าเป็นบวกโดยมีค่าเพิ่มขึ้นจนมากที่สุดที่ตำแหน่งสุดท้าย สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ความเร่งและเวลาได้ ดังรูป 8.13 ก.



ก. กราฟความเร่งกับเวลา



ข. กราฟการกระจัดกับเวลา

รูป 8.13 เปรียบเทียบการกระจัดกับความเร่งที่เวลาต่าง ๆ

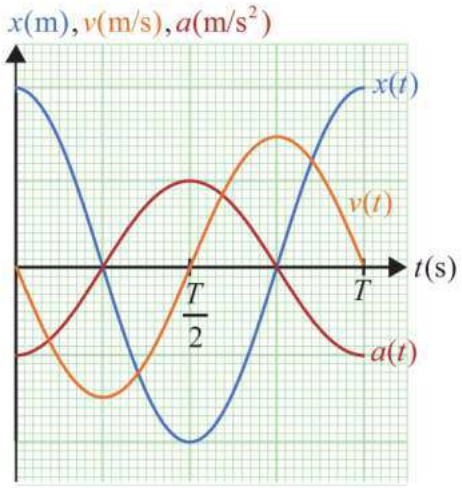
ถ้าเปรียบเทียบกราฟความเร่งกับกราฟการกระจัดที่เวลาต่างๆ ของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของรถทดลองติดปลายสปริงที่เคลื่อนที่ครึ่งรอบ ดังรูป 8.13 ก. และ ข. จะพบว่าความเร่งมีขนาดมากที่สุดที่ตำแหน่งเริ่มต้นซึ่งมีการกระจัดมากที่สุด และมีขนาดลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์ที่ตำแหน่งสมดุล จากนั้นมีขนาดเพิ่มขึ้นจนมากที่สุดที่ตำแหน่งสุดท้าย ซึ่งมีการกระจัดมากที่สุดอีกด้านหนึ่ง และเป็นการเคลื่อนที่ครบครึ่งรอบพอดี

ชวนคิด

จากกิจกรรม 8.1 ในช่วงเวลา 1 คาบ กราฟการกระจัดกับเวลา กราฟความเร็วกับเวลา และกราฟความเร่งกับเวลามีลักษณะอย่างไร

กิจกรรม 8.1 รถทดลองเคลื่อนที่ได้ครึ่งรอบ หากเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ วัตถุจะเคลื่อนที่ย้อนกลับซ้ำรอยเดิมอีกครึ่งรอบ โดยมีความสัมพันธ์ของการกระจัด ความเร็ว และความเร่งทำนองเดียวกันกับครึ่งรอบแรก ซึ่งสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์การกระจัด ความเร็ว ความเร่งกับเวลาของการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบได้ ดังรูป 8.14

จากกราฟจะเห็นว่าตลอดการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ ความเร่งมีทิศทางตรงข้ามกับการกระจัดเสมอ



รูป 8.14 กราฟการกระจัด ความเร็ว ความเร่ง กับเวลา

ข้อสังเกต

จากกิจกรรม 8.1 กราฟการกระจัด พิจารณาได้ในรูปฟังก์ชันตรีโกณมิติเป็น

$x = A\sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ หรือ $x = A\cos\omega t$

ซึ่ง $x = A\sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$ มีเฟสเริ่มต้น $\phi = \frac{\pi}{2}$

ส่วน $x = A\cos\omega t$ มีเฟสเริ่มต้น $\phi = 0$

จะเห็นว่าสมการทั้งสองแบบสามารถใช้อธิบายการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยสามารถเขียนในรูปทั่วไปได้ดังนี้ $x = A\sin(\omega t + \phi)$ หรือ $x = A\cos(\omega t + \phi)$

ในกิจกรรม 8.1 แรงดึงกลับที่ดึงรถทดลองให้เคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งสมดุล คือ แรงที่สปริงกระทำต่อรถทดลอง และจากที่ทราบมาแล้วว่าแรงสปริงกระทำต่อวัตถุมีขนาดเท่ากับค่าคงตัวสปริงคูณกับขนาดของการกระจัด แต่มีทิศตรงข้ามกับทิศของการกระจัดตามสมการ

$$F_{\text{spring}} = -kx \tag{8.9}$$

เมื่อ F_{spring} เป็นแรงดึงกลับของสปริง มีหน่วยเป็น นิวตัน (N)

x เป็นการกระจัดของวัตถุ มีหน่วย เมตร (m)

k เป็นค่าคงตัวของสปริง มีหน่วย นิวตันต่อเมตร (N/m)

จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน $\sum_{i=1}^{N} \vec{F}_i = m\vec{a}$ ระบบการเคลื่อนที่ของวัตถุติดปลายสปริงมีแรงที่กระทำต่อวัตถุเพียง 1 แรง คือแรงดึงกลับ จะได้ว่า

$$\vec{F}_{\text{spring}} = m\vec{a} \tag{8.10}$$

จากสมการ (8.9) และ (8.10) พิจารณาการเคลื่อนที่ตามแนวแกน x จะได้

$$-kx = ma$$

จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งกับการกระจัด ตามสมการ

$$a = -\frac{k}{m}x \tag{8.11}$$

นอกจากนี้สามารถหาความสัมพันธ์ของค่าคงตัวสปริง มวลของวัตถุ ความถี่เชิงมุมของระบบที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายได้โดยเปรียบเทียบสมการ (8.11) กับ (8.5) จะได้

$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

หรือ

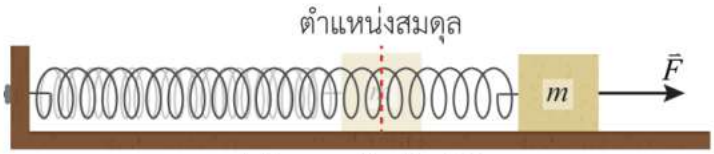
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \tag{8.12}$$

จากความสัมพันธ์ของความถี่เชิงมุมกับคาบ $\omega = \frac{2\pi}{T}$ และความถี่เชิงมุมกับความถี่ $\omega = 2\pi f$ เขียนสมการ (8.12) ที่เป็นความสัมพันธ์ของค่าคงตัวสปริง มวลวัตถุ กับความถี่และคาบ ดังสมการ

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \tag{8.13}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{8.14}$$

ตัวอย่าง 8.9 วัตถุมวล 0.5 กิโลกรัม ติดอยู่กับปลายสปริงที่มีค่าคงตัวสปริง 5.0 นิวตันต่อเมตร อยู่บนพื้นลื่น ดังรูป



รูป ประกอบตัวอย่าง 8.9

เมื่อดึงวัตถุออกจากตำแหน่งสมดุล แล้วปล่อยให้เคลื่อนที่กลับไปกลับมาแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย คาบการเคลื่อนที่เป็นเท่าใด

แนวคิด คาบการเคลื่อนที่ของรถทดลอง หาได้จาก $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$

วิธีทำ $m = 0.5$ kg $k = 5.0$ N/m

$$T = 2(3.1416)\sqrt{\frac{0.5\text{ kg}}{5.0\text{ N/m}}}$$

จะได้ $T = 1.99$ s

ตอบ คาบการเคลื่อนที่เท่ากับ 1.99 วินาที

ตัวอย่าง 8.10 วัตถุมวล 200 กรัม ติดที่ปลายสปริงซึ่งมีค่าคงตัวสปริง 5 นิวตันต่อเมตร ถ้าวัตถุนี้เคลื่อนที่แบบการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายที่ตำแหน่ง $x = 0.05$ m จากตำแหน่งสมดุล วัตถุมีความเร็วเป็นศูนย์ จงหา

ก. ความถี่เชิงมุม

ข. ความเร่งที่ตำแหน่ง $x = 0.02$ m

ค. ขนาดความเร่งสูงสุด

แนวคิด ความถี่เชิงมุมของมวลติดสปริง หาได้จาก $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

ความเร่งที่ตำแหน่งต่าง ๆ หาได้จาก $a = -\omega^2 x$

ความเร่งสูงสุด หาได้จาก $a_{\max} = \omega^2 A$

วิธีทำ ก. ความถี่เชิงมุม

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{5 \text{ N/m}}{0.2 \text{ kg}}}$$

$$= 5 \text{ rad/s}$$

ตอบ ความถี่เชิงมุมเท่ากับ 5 เรเดียนต่อวินาที

ข. จากสมการความสัมพันธ์ของความเร่งกับความถี่เชิงมุมและการกระจัด

$$a = -\omega^2 x$$

$$= -(5 \text{ rad/s})^2 (0.02 \text{ m})$$

$$= -0.5 \text{ m/s}^2$$

ตอบ ความเร่งที่ตำแหน่ง $x = 0.02$ m เท่ากับ -0.5 เมตรต่อวินาที^{2}

ค. จากสมการความสัมพันธ์ของความเร่งกับความถี่เชิงมุมและการกระจัด

$$a_{\max} = -\omega^2 A$$

$$= -(5.0 \text{ rad/s})^2 (0.05 \text{ m})$$

$$= -1.25 \text{ m/s}^2$$

ตอบ ขนาดความเร่งสูงสุดเท่ากับ 1.25 เมตรต่อวินาที^{2} มีทิศตรงข้ามกับการกระจัดขณะนั้น

ตัวอย่าง 8.11 วัตถุมวล 200 กรัม ติดที่ปลายสปริงซึ่งมีค่าคงตัวสปริง 5.0 นิวตันต่อเมตร ถ้าดึงวัตถุและปล่อยจากหยุดนิ่งที่ตำแหน่ง $x = 0.05$ m จงหา

ก. ความเร็วของวัตถุที่ตำแหน่ง $x = 0.03$ m

ข. ขนาดความเร็วที่มีค่าสูงสุด

แนวคิด ความเร็วของวัตถุที่ตำแหน่งต่าง ๆ หาได้จาก $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$

โดยความถี่เชิงมุมของมวลติดปลายสปริง (ω) หาได้จาก $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$

วิธีทำ ก. หาความถี่เชิงมุม

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$= \sqrt{\frac{5 \text{ N/m}}{0.2 \text{ kg}}}$$

$$= 5 \text{ rad/s}$$

จากสมการ

$$v = \pm\omega\sqrt{(A^2 - x^2)}$$

$$= \pm(5.0 \text{ rad/s})\sqrt{(0.05 \text{ m})^2 - (0.03 \text{ m})^2)}$$

$$= \pm 0.2 \text{ m/s}$$

ตอบ ความเร็วของวัตถุที่ตำแหน่ง $x = 0.03$ m เท่ากับ ± 0.2 เมตรต่อวินาที

ข. ความเร็วของวัตถุมีค่าสูงสุดที่ $x = 0$ m หรือตำแหน่งสมดุล

จากสมการ

$$v = \pm\omega\sqrt{(A^2 - x^2)}$$

$$= \pm(5.0 \text{ rad/s})\sqrt{(0.05 \text{ m})^2 - (0 \text{ m})^2)}$$

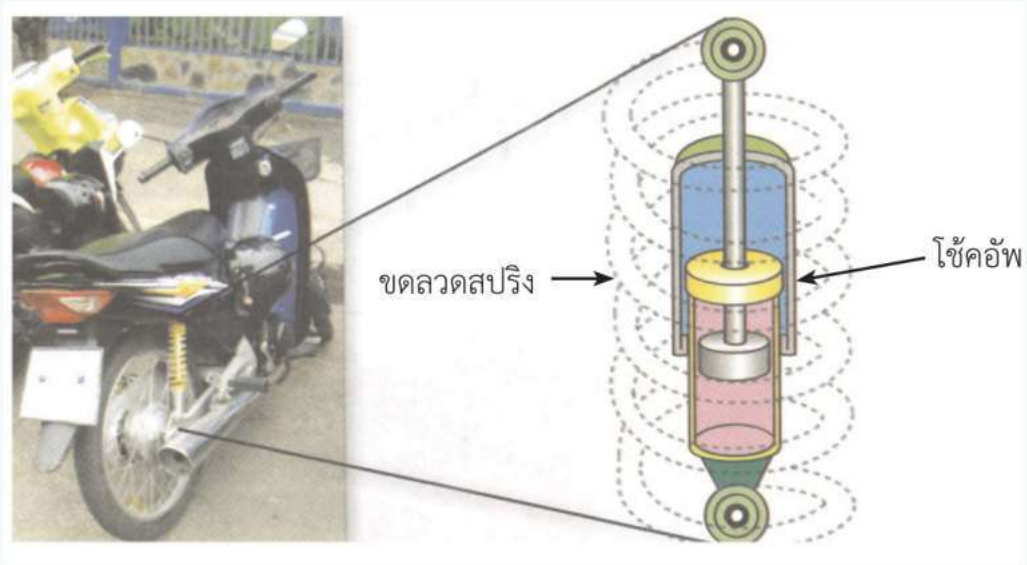
$$= \pm 0.25 \text{ m/s}$$

ตอบ ความเร็วของวัตถุที่ตำแหน่ง $x = 0$ m เท่ากับ ± 0.25 เมตรต่อวินาที

รู้หรือไม่

ระบบกันสะเทือนในยานพาหนะ

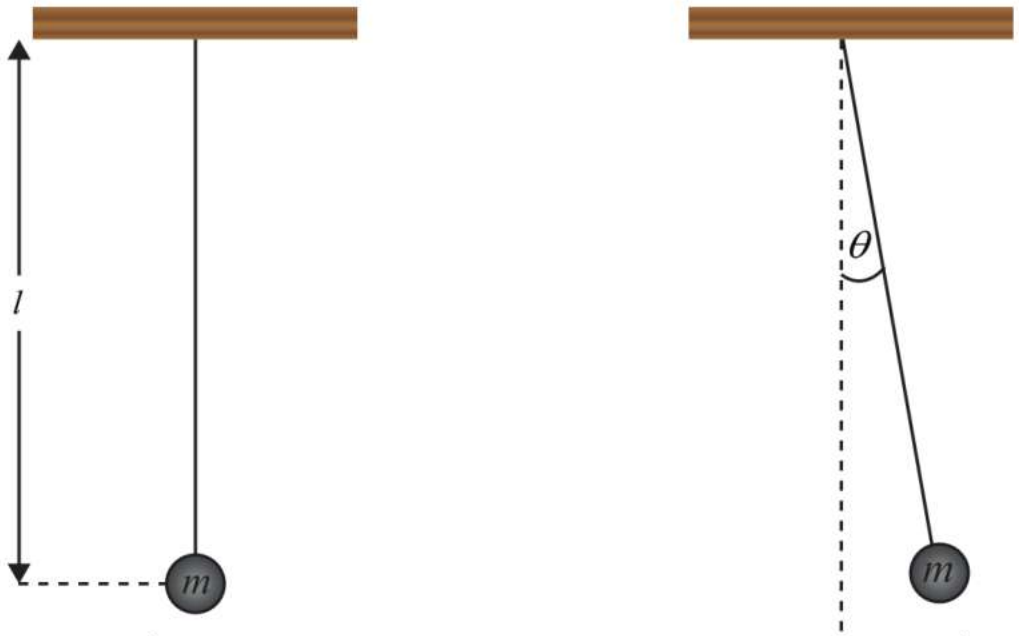
ระบบกันสะเทือนในยานพาหนะ เช่น รถยนต์ หน้าที่หลักคือลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของล้อไปบนพื้นผิวถนนขรุขระ โดยมีขดลวดสปริงเป็นตัวรับน้ำหนักและแรงกระแทกที่เกิดขึ้น ขดลวดสปริงอยู่ระหว่างตัวรถกับล้อ เมื่อยานพาหนะเคลื่อนที่ขดลวดสปริงจะยุบและยืดตัวขึ้นลงคล้ายกับการสั่นของมวลติดปลายสปริง ส่งผลให้ล้อเคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง ทำให้ลดการสั่นของรถลงได้ โดยผลจากการเคลื่อนที่ของล้อถูกส่งถ่ายไปยังตัวรถน้อยกว่าที่ล้อสั่นจริง ทำให้ผู้โดยสารและสัมภาระได้รับแรงสะเทือนน้อยลง อย่างไรก็ตาม รถยังอาจสั่นขึ้นลงตามสมบัติของสปริง จึงมีอุปกรณ์ที่ช่างไทยเรียกว่า โช้คอัพ (shock absorber) เพื่อหน่วงไม่ให้ขดลวดสปริงและล้อมีการสั่นต่อเนื่องนานเกินไป ทำให้เกิดความนุ่มนวลขณะขับขี่



รูป ระบบกันสะเทือนในยานพาหนะ

8.3.2 การแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย

ลูกตุ้มอย่างง่ายใช้ในการบอกเวลามาอย่างยาวนาน ประกอบไปด้วยลูกตุ้มมวล m ที่มีขนาดเล็กเสมือนเป็น**จุดมวล** (point mass) แขวนที่ปลายเชือกเบาที่มีความยาว l ดังรูป 8.15 ก. เมื่อดึงลูกตุ้มให้ทำมุม θ กับแนวดิ่ง โดย θ น้อยกว่า 10 องศา ดังรูป 8.15.ข.



ก. ลูกตุ้มอย่างง่ายที่ตำแหน่งสมดุล ข. ลูกตุ้มทำมุม θ กับแนวดิ่ง

รูป 8.15 ลูกตุ้มอย่างง่ายที่แขวนในแนวดิ่ง

หลังปล่อยมือ ลูกตุ้มจะเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งสมดุลไปอีกด้านหนึ่งและเคลื่อนที่กลับมายังตำแหน่งเริ่มต้น และหากเปลี่ยนความยาวเชือกจะมีผลต่อการเคลื่อนที่อย่างไร จะได้ศึกษาผ่านกิจกรรม 8.2

กิจกรรม 8.2 การทดลองเรื่องลูกตุ้มอย่างง่าย

จุดประสงค์

1. หาคาบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย
2. หาความสัมพันธ์ระหว่างคาบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่าย (T) กับรากที่สองของความยาวเชือก ($\sqrt{l}$)

วัสดุและอุปกรณ์

1. ลูกกลมโลหะ	1 ลูก
2. เชือกเบา (ด้าย)	1 เมตร
3. ไม้เมตร	1 อัน
4. นาฬิกาจับเวลา	1 เรือน
5. ขาตั้ง	1 ชุด

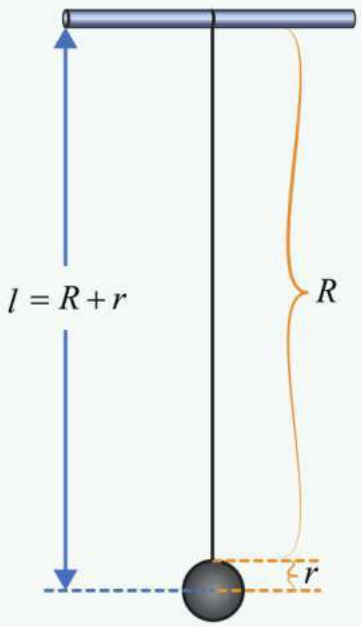
วิธีทำกิจกรรม

1. จัดอุปกรณ์ โดยใช้เชือกผูกกับลูกกลมโลหะ ดังรูป ก. และปลายเชือกอีกด้านหนึ่งผูกติดกับแขนของขาตั้งดังรูป ข. และแขวนลูกกลมโลหะอยู่ในแนวดิ่ง ดังรูป ค.

ก. ข. ค.

รูป การจัดอุปกรณ์การทดลอง

2. วัดความยาวเชือก (l) โดยวัดจากตำแหน่งที่ตรึงเชือกถึงจุดศูนย์กลางมวลของลูกกลมโลหะ ดังรูป และบันทึกผลในตาราง



รูป ตัวอย่างการวัดความยาวเชือก (l)

3. ดึงหรือใช้ไม้บรรทัดทำให้ลูกกลมโลหะทำมุม θ กับแนวดิ่ง โดย θ น้อยกว่า 10 องศา ดังรูป

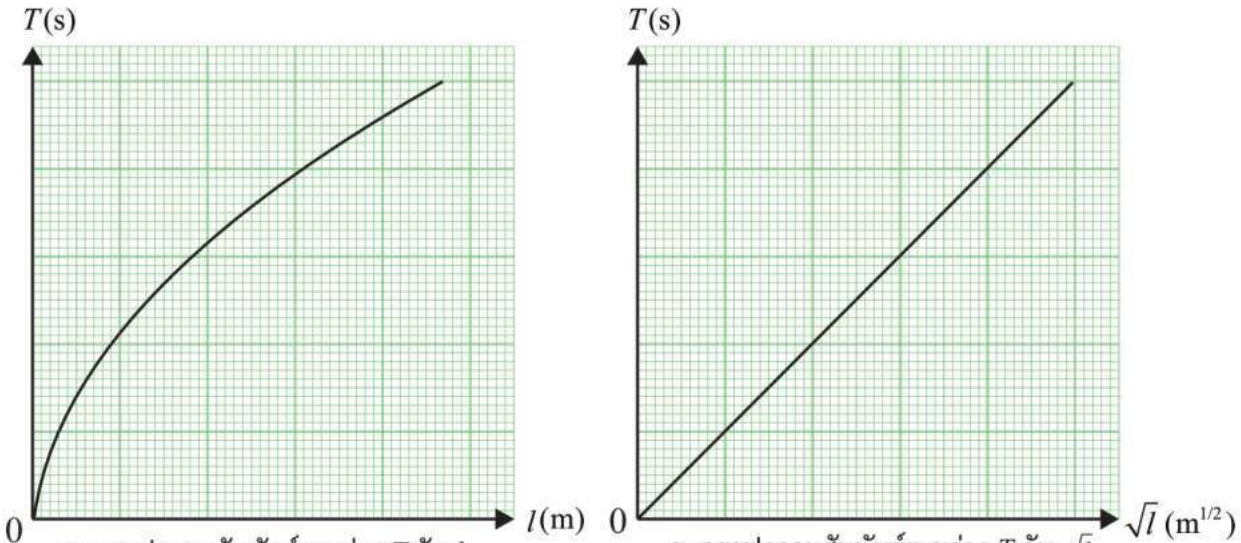
รูป ลูกกลมโลหะทำมุมกับแนวดิ่ง

ปล่อยให้ลูกกลมโลหะแกว่งพร้อมกับจับเวลาที่ใช้ในการแกว่ง 30 รอบ บันทึกเวลา จากนั้นทำการทดลองซ้ำอีกสองครั้ง

4. คำนวณเวลาเฉลี่ยที่ใช้ในการแกว่ง 30 รอบ ($t_{30\ \text{รอบ}}$) คาบ (T) และบันทึกผลในตารางบันทึกผล
5. ทำซ้ำตามข้อ 1-4 โดยเปลี่ยนความยาวของเชือกอีก 4 ค่า
6. เขียนกราฟระหว่าง T กับ l โดยให้ T อยู่บนแกนตั้ง l อยู่บนแกนนอน
7. เขียนกราฟระหว่าง T กับ $\sqrt{l}$ โดยให้ T อยู่บนแกนตั้ง $\sqrt{l}$ อยู่บนแกนนอน

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ จากกราฟ T กับ l มีลักษณะอย่างไร เขียนความสัมพันธ์ของสองปริมาณนี้ได้อย่างไร
- ☐ จากกราฟ T กับ $\sqrt{l}$ มีลักษณะอย่างไร และปริมาณทั้งสองมีความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือไม่



ก. กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ l ข. กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ $\sqrt{l}$

รูป 8.16 กราฟ T กับ l และกราฟ T กับ $\sqrt{l}$

จากกิจกรรม 8.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ l มีลักษณะไม่เชิงเส้น (เป็นเส้นโค้ง) ดังรูป 8.16 ก. และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ $\sqrt{l}$ มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง T กับ $\sqrt{l}$ เป็นกราฟเส้นตรง ดังรูป 8.16 ข. จะเห็นว่าเมื่อความยาวเชือกเพิ่มขึ้น คาบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายมีค่าเพิ่มขึ้น ตามสมการ

$$T = k\sqrt{l} \qquad (8.15)$$

จากรูป 8.17 หลังจากปล่อยมือจะมีแรงดึงกลับ F กระทำต่อลูกตุ้มมวล m ดึงให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่กลับไปอีกด้านผ่านตำแหน่งสมดุลและเคลื่อนที่กลับมาตำแหน่งเดิม แรงดึงกลับดังกล่าวมีค่าตามสมการ

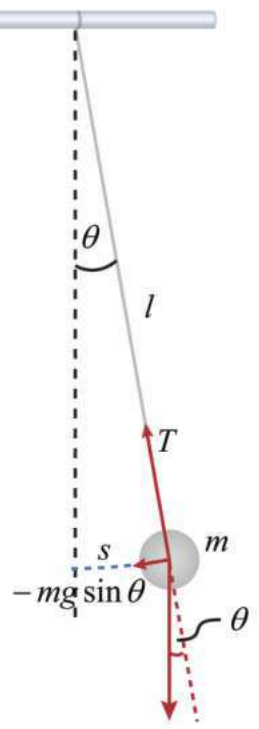
$$F = -mg\sin\theta \qquad (8.16)$$

ถ้ามุม θ มีค่าน้อยมาก ๆ เช่น $\theta = 9^\circ$ คิดเป็นมุมในหน่วยเรเดียนได้เท่ากับ $\theta = 0.1571$ rad และมีค่า $\sin(0.1571\text{ rad}) = 0.1565$ จึงสามารถประมาณได้ว่ามุมในหน่วยเรเดียน $\sin\theta \approx \theta$ และเขียนสมการ (8.16) ใหม่ได้เป็น

$$F = -mg\theta \qquad (8.17)$$

มุม θ หาได้จากอัตราส่วนระหว่างความยาวส่วนโค้งกับรัศมีของวงกลมตามสมการ

$$\theta = \frac{s}{l}$$



รูป 8.17 แผนภาพแรงที่กระทำต่อลูกตุ้มมวล m

จะได้ $$F = -mg\left(\frac{s}{l}\right) \quad (8.18)$$

เมื่อ F คือ แรงดึงกลับ
s คือ ความยาวส่วนโค้ง
m คือ มวลของลูกตุ้ม
l คือ ความยาวเชือก

จะเห็นว่ามีแรงเพียงหนึ่งแรงที่มีผลต่อการเคลื่อนที่ คือแรงดึงกลับ จากกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตันจะได้

$$F = ma$$

แทนค่าแรงดึงกลับ F ในสมการ (8.18)

จะได้ $$ma = -mg\frac{s}{l}$$

$$a = -\frac{g}{l}s \quad (8.19)$$

ในระบบลูกตุ้มอย่างง่าย s เป็นส่วนโค้งช่วงสั้น ๆ เมื่อเทียบกับรัศมีถือว่าเป็นการกระจัดเชิงเส้น และจากสมการ (8.19) ความเร่งของลูกตุ้มแปรผันตรงกับการกระจัดเชิงเส้นและจากเครื่องหมายแสดงให้เห็นว่าความเร่งและการกระจัดมีทิศทางตรงข้ามกัน เมื่อนำสมการ (8.19) มาเปรียบเทียบกับสมการ (8.7) ดังสมการ

$$-\frac{g}{l}s = -\omega^2 s$$

จะได้ความสัมพันธ์ของความถี่เชิงมุมกับความยาวเชือก ดังสมการ

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (8.20)$$

และจากความสัมพันธ์ของความถี่เชิงมุมกับคาบและความถี่จะได้

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (8.21)$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{l}} \quad (8.22)$$

จากสมการ (8.21) จะเห็นว่าคาบไม่ขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของการแกว่ง สำหรับการแกว่งที่มีแอมพลิจูดน้อย ๆ ทำให้ลูกตุ้มมีประโยชน์ในการใช้จับเวลาหรือทำเป็นนาฬิกา คาบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายขึ้นอยู่กับค่าความเร่งเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลก g และความยาวของเชือก l

ตัวอย่าง 8.12 ลูกตุ้มอย่างง่ายมีความยาวของสายลูกตุ้ม 50 เซนติเมตร คาบมีค่าเท่าใด

แนวคิด คาบการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายลูกตุ้มอย่างง่าย หาจากสมการ $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$

วิธีทำ $l = 0.5$ m

จะได้ $$T = 2(3.1416)\sqrt{\frac{0.50\text{ m}}{9.8\text{ m/s}^2}}$$

$$= 1.42\text{ s}$$

ตอบ คาบการเคลื่อนที่เมื่อใช้สายลูกตุ้มยาว 50 เซนติเมตร มีค่าเท่ากับ 1.42 วินาที

ตัวอย่าง 8.13 ลูกตุ้มอย่างง่ายมีคาบบนผิวโลกเท่ากับ 3.0 วินาที ถ้านักบินอวกาศนำลูกตุ้มอย่างง่ายอันเดิมนี้ไปหาคาบบนดวงจันทร์ได้เท่ากับ 7.4 วินาที ให้หาค่าความเร่งโน้มถ่วงบนดวงจันทร์ ให้ความเร่งโน้มถ่วง g บนผิวโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที^{2}

แนวคิด คาบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายบนผิวโลก $$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad (1)$$

คาบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายบนผิวดวงจันทร์ $$T_M = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g_M}} \quad (2)$$

วิธีทำ นำสมการ (2) หารด้วย (1) $$\frac{T_M}{T} = \sqrt{\frac{g}{g_M}}$$

$$g_M = \left(\frac{T}{T_M}\right)^2 g$$

$$g = \left(\frac{3.0\text{ s}}{7.4\text{ s}}\right)^2 \left(9.8\text{ m/s}^2\right)$$

$$= 1.6\text{ m/s}^2$$

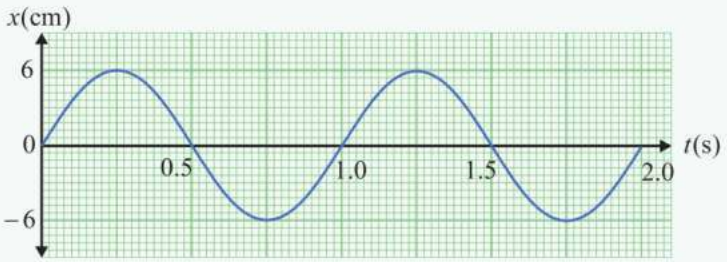
ตอบ ค่าความเร่งโน้มถ่วงบนผิวดาวอังคาร เท่ากับ 1.6 เมตรต่อวินาที^{2}

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 8.3

1. จงอธิบายแรงดึงกลับ
2. ถ้าต้องการเพิ่มคาบการสั่นของวัตถุติดปลายสปริงสามารถทำได้ด้วยวิธีใดบ้าง
3. ถ้าต้องการเพิ่มความถี่เชิงมุมของลูกตุ้มอย่างง่าย ทำได้ด้วยวิธีใดบ้าง
4. ถ้าความยาวเชือกเท่ากับ 60 เซนติเมตร คาบของลูกตุ้มอย่างง่าย มวล m และ $2m$ มีค่าเท่ากันหรือไม่ อย่างไร

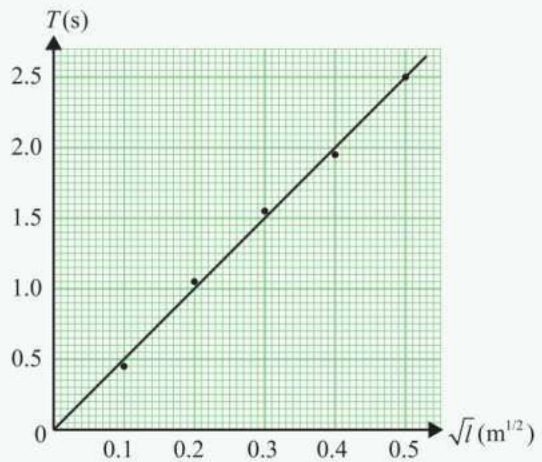
แบบฝึกหัด 8.3

1. แขวนมวล 4.9 กิโลกรัมกับสปริง แล้วปล่อยให้สั่นขึ้นลง วัดคาบของการสั่นได้ 0.5 วินาที ถ้าเอามวล 4.9 กิโลกรัมออก สปริงจะสั้นกว่าตอนที่แขวนมวลอยู่เท่าใด
2. เมื่อนำมวล 0.5 กิโลกรัม แขวนกับปลายสปริงในแนวดิ่ง ทำให้สปริงมีความยาวเพิ่มขึ้น 4.9 เซนติเมตร ถ้าทำให้มวลติดสปริงสั่นในแนวดิ่ง จะสั่นได้กี่รอบในเวลา 1 วินาที (ให้คำตอบติดค่า π)
3. จากรูป เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดกับเวลาของการเคลื่อนที่ของวัตถุมวล 50.0 กรัม ซึ่งติดไว้กับปลายข้างหนึ่งของลวดสปริงเบา ถ้าไม่คิดแรงเสียดทานที่กระทำต่อวัตถุและลวดสปริง ค่าคงตัวของลวดสปริงมีค่าเท่าใดในหน่วยนิวตันต่อเมตร



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 3

4. ลูกเหล็กทรงกลมมวล 1 กรัม แกว่งแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีแอมพลิจูด 2 มิลลิเมตร ความเร่งที่จุดปลายของการแกว่งมีค่า 8×10^3 เมตรต่อวินาที^{2}
   ก. จงหาความถี่ของการแกว่ง
   ข. จงหาความเร็วที่ตำแหน่งสมดุล
   ค. จงเขียนสมการแสดงแรงที่กระทำต่อให้ลูกเหล็กทรงกลมให้เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและฟังก์ชันของเวลา
5. จากรูป เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างคาบการแกว่งของลูกตุ้มกับรากที่สองของความยาวเชือกบนดาวดวงหนึ่ง ถ้าลูกตุ้มเป็นการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ค่าความเร่งโน้มถ่วงเนื่องจากดาวดวงนี้เป็นเท่าใด



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 5

8.4 ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้อง

จากตัวอย่างข้างต้นของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย จะเห็นว่าวัตถุจะสั่นหรือแกว่งด้วยความถี่คงตัวค่าหนึ่ง เช่น ระบบการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายความยาว l ลูกตุ้มแกว่งจะด้วยความถี่คงตัวค่าหนึ่ง เรียกความถี่นี้ว่า **ความถี่ธรรมชาติ** (natural frequency) โดยความถี่ธรรมชาติคือ ความถี่ในการสั่นของวัตถุหรือระบบที่มีแนวโน้มที่จะสั่นเมื่อถูกรบกวน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะของแต่ละระบบ ถ้าทำให้ลูกตุ้มอย่างง่ายในระบบหนึ่งแกว่งด้วยแรงจากภายนอกที่มีความถี่ต่างกัน ระบบจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร จะได้ศึกษาผ่านกิจกรรม 8.3

ตัวอย่าง 8.14 ลูกตุ้มขนาดเล็กมีความยาวเชือกคงตัวค่าหนึ่งใช้เวลาในการแกว่งครบ 1 รอบ เท่ากับ 0.5 วินาที การแกว่งของลูกตุ้มนี้มีความถี่ธรรมชาติเป็นเท่าใด

แนวคิด ความถี่ธรรมชาติของลูกตุ้มหาได้จากความถี่ของการแกว่งโดยอิสระของลูกตุ้มเมื่อความยาวเชือกของลูกตุ้มคงตัว

วิธีทำ จากสมการ $T = \frac{1}{f}$ แทนค่า $T = 0.5$ s จะได้

$$0.5 \text{ s} = \frac{1}{f}$$

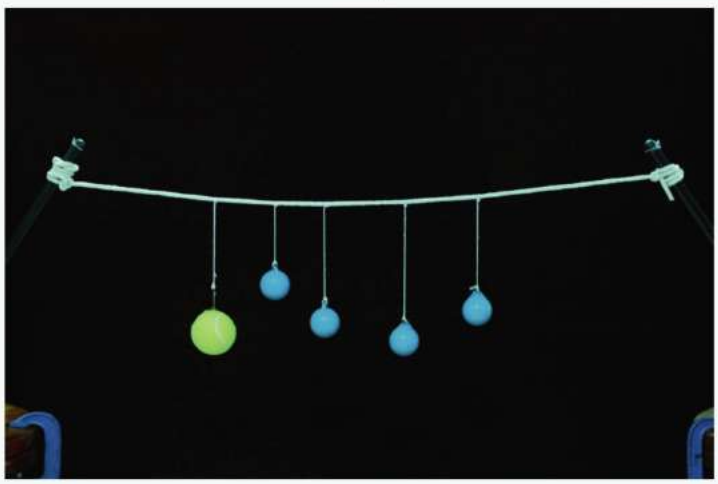
$$f = 2 \quad \text{รอบต่อวินาที}$$

ตอบ ความถี่ธรรมชาติของลูกตุ้มมีค่าเท่ากับ 2 รอบต่อวินาที

กิจกรรม 8.3 ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้องของวัตถุ

จุดประสงค์

ศึกษาความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้องของวัตถุ



รูป การจัดวางอุปกรณ์ในกิจกรรม

วิธีทำกิจกรรม

1. นำลูกตุ้มขนาดเล็กหลายลูกมาผูกกับเชือกที่มีความยาวต่างกัน
2. นำลูกตุ้มขนาดใหญ่ผูกด้วยเชือกที่มีความยาวเท่ากับความยาวของเชือกที่ผูกลูกตุ้มขนาดเล็กลูกใดลูกหนึ่ง
3. ขึงเชือกเส้นโตเป็นราวสำหรับแขวนลูกตุ้ม แล้วนำลูกตุ้มในข้อ 1 และ ข้อ 2 ไปแขวนดังรูป
4. แกว่งลูกตุ้มขนาดใหญ่และสังเกตการแกว่งของลูกตุ้มขนาดเล็ก

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ เมื่อลูกตุ้มขนาดใหญ่แกว่ง ลูกตุ้มขนาดเล็กมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- ☐ ลูกตุ้มขนาดเล็ก ลูกใดมีการกระจัดมากที่สุด

พิจารณาลูกตุ้มที่มีความยาวเชือกต่างกัน จะพบว่าแต่ละอันจะมีความถี่ของการแกว่งหรือความถี่ธรรมชาติต่างกัน จากกิจกรรม 8.3 ระบบประกอบด้วยลูกตุ้มขนาดเล็กสี่ลูกที่มีความยาวเชือกต่างกันแขวนกับเชือกเส้นเดียวกัน ผูกเชือกลูกตุ้มขนาดใหญ่ที่มีความยาวเท่ากับลูกตุ้มขนาดเล็กลูกหนึ่ง เมื่อทำให้ลูกตุ้มขนาดใหญ่แกว่งจะแกว่งด้วยความถี่ธรรมชาติ ค่าหนึ่ง ซึ่งจะส่งผลให้ลูกตุ้มขนาดเล็กแต่ละลูกจะเริ่มแกว่ง จะสังเกตเห็นว่าลูกตุ้มขนาดเล็กที่มีความยาวเท่ากับลูกตุ้มขนาดใหญ่จะแกว่ง โดยมีช่วงกว้างเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีช่วงกว้างมากกว่าเมื่อเทียบกับลูกตุ้มขนาดเล็กลูกอื่น

เมื่อวัตถุถูกกระตุ้นต่อเนื่องให้สั่นอย่างอิสระด้วยแรงหรือพลังงานที่มีความถี่เท่ากับหรือใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ วัตถุนั้นจะสั่นด้วยความถี่ธรรมชาติของวัตถุนั้นและสั่นด้วยแอมพลิจูดที่มีค่ามาก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า **การสั่นพ้อง** (resonance) ปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์มีตัวอย่างการสั่นพ้องมากมาย เช่น นักร้องเพลงโอเปร่าที่สามารถออกเสียงที่มีความถี่ใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของแก้วจนทำให้แก้วแตก หรือการแกว่งชิงช้า ถ้าเราออกแรงผลักด้วยความถี่ที่สอดคล้องกับความถี่ในการแกว่งของชิงช้าจะทำให้ชิงช้านั้นแกว่งด้วยแอมพลิจูดสูงมาก เมื่อเกิดการสั่นพ้อง ถ้าให้ความถี่ของแรงกระทำใกล้เคียงความถี่ธรรมชาติของระบบ จะทำให้ระบบดูดซับพลังงานได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับความถี่ค่าอื่น ๆ

ความรู้เพิ่มเติม

การสั่นพ้องในตึกสูง

ไทเป 101 เป็นตึกสูงในเมืองไทเป ประเทศไต้หวัน มีความสูง 509.2 เมตร ไต้หวันอยู่ในบริเวณที่เกิดไต้ฝุ่นและแผ่นดินไหวอยู่เสมอ ซึ่งเป็นอันตรายต่อตัวตึก วิศวกรจึงออกแบบตึกไทเป 101 ให้ทนทานต่อภัยธรรมชาติเหล่านี้ โดยติดตั้งตัวหน่วง (damper) ซึ่งมีชิ้นส่วนสำคัญคือลูกตุ้มเหล็กกล้า (steel pendulum) ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.5 เมตร มวล 660000 กิโลกรัม แขวนอยู่ในช่วงชั้น 87 ถึงชั้น 92 อุปกรณ์นี้จะทำหน้าที่ดูดกลืนพลังงานเพื่อลดหรือต้านการสั่น โครงสร้างตึกจึงไม่เสียหาย ถ้าตึกสูงมากไม่มีตัวดูดซับหรือลดทอนพลังงาน พลังงานจากพายุและแผ่นดินไหวจะถ่ายโอนอย่างต่อเนื่องเข้าสู่ตัวตึก ทำให้แอมพลิจูดของการสั่นกว้าง ถ้าความถี่ของการสั่นตรงกับความถี่ธรรมชาติของตึก จะเกิดการสั่นพ้องจนสามารถทำลายตึกได้ ตัวหน่วงของตึกไทเป 101 มีขนาดใหญ่ที่สุดในโลก จึงเป็นสิ่งดึงดูดนักท่องเที่ยวให้ไปชม

รูป ลูกตุ้มเหล็กกล้าของตัวหน่วง

รู้หรือไม่

การสั่นพ้องของสะพาน

บางคนคงเคยข้ามสะพานแขวน (suspension bridge) ขนาดเล็กสำหรับเดินข้ามคลอง ขณะเดินข้ามบางครั้งจะรู้สึกว่าสะพานสั่นไหว นอกจากนี้เมื่อมีลมเข้าปะทะก็อาจทำให้สะพานสั่นมากขึ้น แต่เมื่อใดที่จังหวะการปะทะของลมหรือจังหวะการเดินของคนตรงกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน จะเกิดการสั่นพ้องแอมพลิจูดมีช่วงกว้างมากจนสะพานอาจเสียหายได้ นอกจากนี้สะพานลอยคนข้ามถนนที่มีโครงสร้างเหล็กและมีความยาวมาก (เช่น สะพานข้ามถนน 8 ช่องทางจราจรในกรุงเทพ) ขณะมีรถบรรทุกแล่นใต้สะพานหรือคนเดินข้ามบางครั้งจะรู้สึกว่าสะพานสั่นน้อย ๆ เช่นกัน

การสั่นของสะพานขนาดใหญ่ที่น่าตื่นเต้นที่สุดเกิดขึ้นกับสะพานทาโคมานาร์โรว์ (Tacoma narrows bridge) ดังรูป ใกล้เมืองซีแอตเติล มลรัฐวอชิงตัน สหรัฐอเมริกา สะพานนี้เป็นสะพานแขวน (suspension) มีความยาวทั้งหมด 1810 เมตร ช่วงกลางมีความยาว 853.4 เมตร ถูกลมจากทะเลเข้าปะทะทำให้พื้นสะพานบิดตัวกลับไปมา และในตอนเช้าวันที่ 7 พฤศจิกายน พ.ศ. 2483 ลมที่เข้าปะทะมีอัตราเร็ว 64 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ทำให้พื้นสะพานสั่นอย่างรุนแรง และพังลง

รูป สะพานทาโคมานาร์โรว์

นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรได้อธิบายว่า การปะทะของลมทำให้พื้นสะพานสั่นตรงกับความถี่ธรรมชาติของสะพาน เกิดการสั่นพ้องจนทำให้สะพานพัง เหตุการณ์นี้ทำให้การออกแบบสะพานที่มีความยาวมาก (long-span bridge) ต้องคำนึงถึงการสั่นพ้องที่จะเกิดกับตัวสะพาน สะพานทาโคมานาร์โรว์ใหม่ถูกสร้างขึ้นในบริเวณเดิมในอีก 10 ปีต่อมา

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 8.4

1. ในการกระตุ้นให้วัตถุสั่นอย่างอิสระพบว่าทุกครั้ง วัตถุสั่นด้วยความถี่ค่าเดิมเสมอ ความถี่นี้เรียกว่าอะไร
2. จากกิจกรรม 8.3 การที่ลูกตุ้ม ที่มีความยาวเชือกเท่ากับลูกตุ้มลูกใหญ่แกว่งด้วยการกระจัดมากที่สุด เพราะเกิดปรากฏการณ์ใด

แบบฝึกหัด 8.4

1. จงหาความถี่ธรรมชาติของการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายที่ผูกติดกับเชือกเบาที่มีความยาว 50 เซนติเมตร
2. จงหาความถี่ธรรมชาติของวัตถุติดปลายสปริง เมื่อวัตถุมีมวล 0.1 กิโลกรัม และสปริงมีค่าคงตัวของสปริง 1000 นิวตันต่อเมตร

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

8.1 ลักษณะการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

- การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย เป็นการสั่นหรือการแกว่งกวัดกลับไปกลับมาซ้ำทางเดิมผ่านตำแหน่งสมดุล โดยมีเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบเรียกว่า คาบ และมีการกระจัดสูงสุด เรียกว่า แอมพลิจูด ของการเคลื่อนที่คงตัว

8.2 ปริมาณที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

- การกระจัด ความเร็ว และความเร่งของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายขึ้นกับเวลาตามสมการ

  การกระจัด $x = A\sin(\omega t + \phi)$

  ความเร็ว $v = A\omega\cos(\omega t + \phi)$

  ความเร่ง $a = -A\omega^2\sin(\omega t + \phi)$

- ความเร่งและการกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายสัมพันธ์กัน ตามสมการ $a = -\omega^2 x$ โดยความเร่งแปรผันตรงกับการกระจัด แต่มีทิศทางตรงข้ามกัน
- ความเร็วและการกระจัดของการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายสัมพันธ์กันตามสมการ $v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$

8.3 แรงกับการสั่นของมวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มอย่างง่าย

- สำหรับการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย จะมีแรงดึงวัตถุกลับมายังตำแหน่งสมดุล เรียกแรงนี้ว่า แรงดึงกลับ
- ความถี่เชิงมุม คาบ และความถี่ ของการสั่นของมวลติดปลายสปริงสัมพันธ์กับค่าคงตัวสปริง (k) และมวลของวัตถุ (m) ซึ่งเป็นไปตามสมการ

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

- ความถี่เชิงมุม คาบ และความถี่ ของการแกว่งของลูกตุ้มอย่างง่ายสัมพันธ์กับความยาวเชือกตามสมการ

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

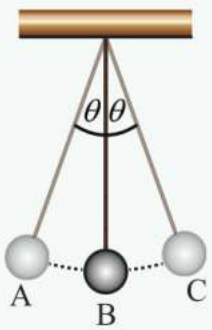
8.4 ความถี่ธรรมชาติและการสั่นพ้อง

- เมื่อให้วัตถุสั่นหรือแกว่งอย่างอิสระ วัตถุจะสั่นหรือแกว่งด้วยความถี่ค่าหนึ่งเรียกว่าความถี่ธรรมชาติ ซึ่งมีค่าคงตัวเมื่อมีแรงกระตุ้นต่อวัตถุแล้วทำให้วัตถุสั่นหรือแกว่ง โดยความถี่ของการให้แรงกระตุ้นเท่ากับความถี่ธรรมชาติของวัตถุ วัตถุจะสั่นหรือแกว่งโดยมีแอมพลิจูดเพิ่มขึ้น เรียกว่า การสั่นพ้อง
- ความรู้เรื่องการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ความถี่ธรรมชาติ และการสั่นพ้องถูกนำมาประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น ระบบต้านแผ่นดินไหวของตึกสูง การออกแบบสะพาน

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8

คำถาม

1. จงบรรยายการเคลื่อนที่ของวัตถุในตัวอย่าง 8.2
2. วัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ขณะที่วัตถุอยู่ที่ตำแหน่งสมดุล ปริมาณใดบ้างที่เป็นศูนย์
3. จงเปรียบเทียบมุมเฟสของกราฟตามสมการ $v = A\omega\cos(\omega t + \phi)$ และ $a = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi)$
4. $x = A\sin(\omega t + \phi)$ และ $x = A\cos(\omega t + \phi)$ เป็นสมการการกระจัดของวัตถุที่มีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย สมการทั้งสองแตกต่างกันอย่างไร
5. ลูกตุ้มเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายระหว่างจุด A และจุด C โดย B เป็นจุดต่ำสุด ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 5

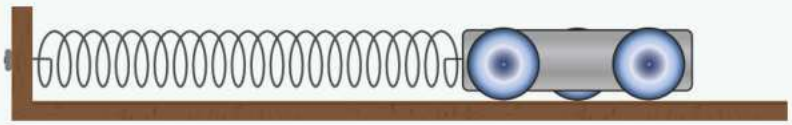
จงเขียนแผนภาพแสดงแรงกระทำต่อลูกตุ้ม ในขณะที่ลูกตุ้มอยู่ที่จุด A จุด B และจุด C

6. จงอธิบายการสาธิตการสั่นพ้องในห้องเรียน (หรือห้องปฏิบัติการ) ระบุอุปกรณ์ที่ใช้ วิธีการและผลที่เกิดขึ้น

ปัญหา

1. ส้อมเสียงอันหนึ่งสั่น 5000 รอบในเวลา 20 วินาที คาบและความถี่ของส้อมเสียงมีค่าเท่าใด
2. ในการบันทึกภาพการกระพือปีกของนกชนิดหนึ่ง พบว่านกกระพือปีกด้วยความถี่ 20 เฮิรตซ์ คาบและความถี่เชิงมุมของการกระพือปีกเป็นเท่าใด

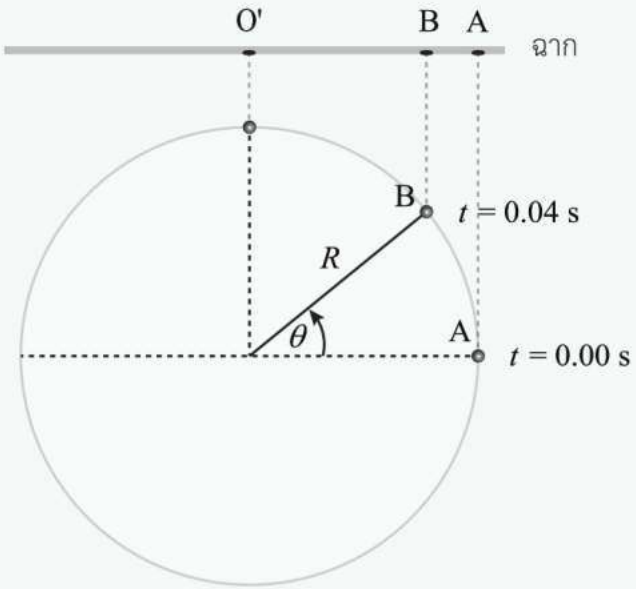
3. วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายตามแนวแกน x มีคาบการเคลื่อนที่เป็น 6 วินาที มีสมการการเคลื่อนที่เป็น $x = A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)$ เมื่อ A และ T เป็นค่าคงตัว t เป็นเวลา เวลาที่ใช้เคลื่อนที่จากตำแหน่ง $x = 0$ ไป $x = \frac{1}{2}A$ มีค่าเท่าใด
4. รถทดลองติดอยู่กับปลายข้างหนึ่งของสปริงที่วางบนพื้นราบลื่น ตรึงปลายอีกข้างของสปริงไว้ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 4

ถ้ารถเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยมีแอมพลิจูด 0.4 เมตร และอัตราเร็วสูงสุดเป็น 2.0 เมตรต่อวินาที ในเวลา 10 วินาที รถวิ่งกลับไปกลับมาได้กี่รอบ (ให้คำตอบติดค่า π)

5. อนุภาคมวล 0.2 กิโลกรัม เคลื่อนที่เป็นวงกลมรัศมี 5.0 เซนติเมตร ด้วยอัตราเร็วเชิงมุมคงตัว 40π เรเดียนต่อวินาที ทำให้เงาของวัตถุบนฉากเคลื่อนที่กลับไปกลับมาแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายรอบจุด O' ถ้าวัตถุเริ่มเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ถึง B โดยใช้เวลา 0.04 วินาที ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 5

ขณะวัตถุอยู่ที่ตำแหน่ง B จงหาขนาดของ

ก. การกระจัด ข. ความเร็ว ค. ความเร่ง

6. สมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของอนุภาคเป็น $x = (5.00\ \text{cm})\cos\left(\frac{\pi}{60}t\right)$ เมื่อ x เป็นการกระจัด ในหน่วย เซนติเมตร t เป็นช่วงเวลาการเคลื่อนที่ ในหน่วย วินาที ที่เวลา $t = 10.0$ วินาที

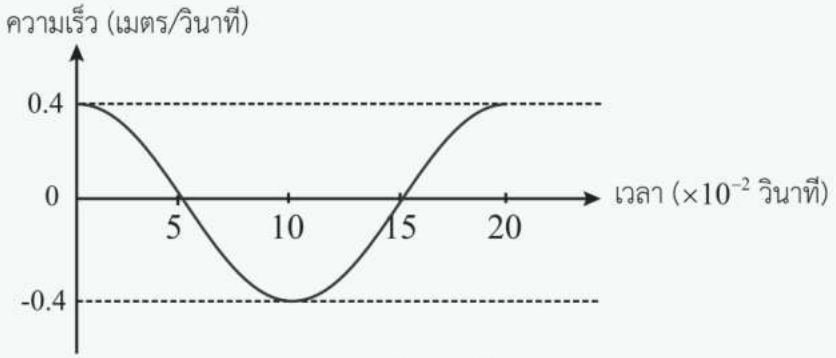
   จงหา ก. การกระจัดของอนุภาค

   ข. ความเร็ว

   ค. ความเร่ง

7. อนุภาคหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีแอมพลิจูด 30 เซนติเมตร มีคาบการเคลื่อนที่ 4 วินาที อัตราเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่มีค่าเท่าใด

8. กราฟระหว่างความเร็วกับเวลาของอนุภาคหนึ่ง เป็นดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 8

   ที่เวลา 5×10^{-2} วินาที อนุภาคมีขนาดความเร่งเท่าใด (ให้คำตอบติดค่า π)

9. วัตถุหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายด้วยแอมพลิจูด 2.00 เซนติเมตร ในแนวระดับ ความเร็วของวัตถุที่ตำแหน่งใดจากตำแหน่งสมดุลมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของความเร็วสูงสุด

10. รถทดลองติดปลายลวดสปริงเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ด้วยแอมพลิจูด 15 เซนติเมตร และความถี่ 4 รอบต่อวินาที จงหาความเร็วสูงสุด และความเร่งสูงสุดของรถทดลอง

11. ลูกตุ้มมวล m ผูกเชือกยาว L แกว่งแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีคาบการแกว่งเป็น 2 วินาที ถ้าใช้ลูกตุ้มมวล $2m$ แกว่งแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ต้องการให้มีคาบการแกว่งเป็น 1 วินาที ต้องใช้เชือกยาวกี่เท่าของความยาว L

12. อนุภาคหนึ่งสั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายในแนวแกน y โดยมีการกระจัด ความเร็วและความเร่งของอนุภาค ดังสมการ $y = A\cos\omega t$ $v = -\omega A\sin\omega t$ และ $a = -\omega^2 A\cos\omega t$ ตามลำดับ

ก. กรอกข้อมูลการกระจัด ความเร็วและความเร่งของอนุภาคที่มุมเฟสต่าง ๆ ลงในตารางต่อไปนี้

มุมเฟส ωt	การกระจัด y	ความเร็ว v	ความเร่ง a
0			
$\frac{\pi}{2}$			
π			
$\frac{3\pi}{2}$			
2π			

ข. เขียนกราฟระหว่างการกระจัดกับเวลา ความเร็วกับเวลา และความเร่งกับเวลา

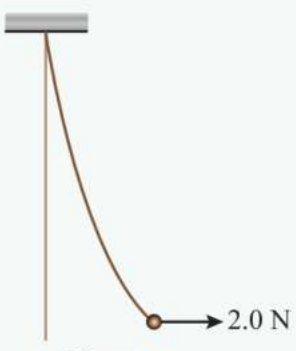
13. แขวนมวล 4.0 กิโลกรัมกับสปริงแล้วปล่อยให้สั่นขึ้นลงในแนวดิ่ง ปรากฏว่าวัดคาบการสั่นได้ 2.0 วินาที ถ้านำมวล 8.0 กิโลกรัม มาแขวนแทนมวล 4.0 กิโลกรัม แล้วปล่อยให้สั่นขึ้นลง จะสั่นด้วยความถี่เท่าใด

14. เมื่อออกแรง 2.0 นิวตัน ดึงปลายแผ่นสปริงของเครื่องชั่งมวล ปลายแผ่นสปริงเบนไปจากตำแหน่งสมดุล 10 เซนติเมตร ดังรูป ที่ปลายแผ่นสปริงติดมวล 0.3 กิโลกรัม ถ้าดึงให้ปลายแผ่นสปริงเบนไปจากตำแหน่งสมดุล 15 เซนติเมตร แล้วปล่อยมือ จงหา

ก. ค่าคงตัวสปริง

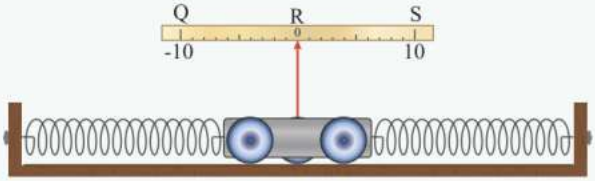
ข. คาบของการสั่นของมวล

ค. ขนาดความเร่งสูงสุดของมวล



รูป ประกอบคำถามข้อ 14

15. รถทดลองมวล 2 กิโลกรัม ปลายทั้งสองยึดติดกับสปริงที่เหมือนกันทุกประการ ดังรูป รถเคลื่อนที่ระหว่างสปริงบนพื้นราบลื่น (ไม่คิดแรงเสียดทาน) ตอนบนของรถติดเข็มชี้ไว้และเข็มชี้จะเคลื่อนที่ระหว่างจุด Q กับ S เป็นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย บนสเกลที่วัดเป็นเซนติเมตร มี R เป็นจุดสมดุล ณ เวลา $t = 0$ รถเริ่มเคลื่อนที่จากจุด Q ไปทางขวามือ ซึ่งมีเครื่องหมายบวก



รูป ประกอบปัญหาข้อ 15

ก. ถ้าคาบของการสั่นในหน่วยวินาทีเท่ากับ π แรงดึงกลับที่กระทำต่อรถในหน่วยนิวตัน ณ เวลา เริ่มต้น มีค่าเท่าใด

ข. ความเร็วของรถทดลองที่ตำแหน่ง S มีค่าเท่าใด ในหน่วยเมตรต่อวินาที

16. กล่องมวล m ติดอยู่กับปลายข้างหนึ่งของสปริงและอยู่บนพื้นระดับลื่น มีคาบของการสั่น 4.0 วินาที ถ้านำวัตถุมวล 1.0 กิโลกรัม ไปวางบนกล่อง คาบการสั่นเป็น 5.0 วินาที จงหามวลของกล่อง

17. กล่องมวล m อยู่บนแผ่นราบที่กำลังสั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายในระนาบระดับ ด้วยความถี่ 2.0 เฮิรตซ์ ถ้ากล่องไม่ไถลบนแผ่นราบ จงหาการกระจัดสูงสุด กำหนดให้สัมประสิทธิ์ความเสียดทานสถิตระหว่างกล่องและแผ่นราบเท่ากับ 0.6

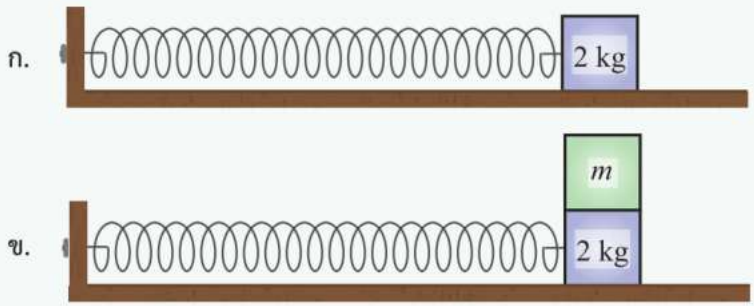
18. สมการการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายของวัตถุเป็น $x = (5.00\ \text{cm})\cos(3t)$ เมื่อ x เป็นการกระจัด หน่วย เซนติเมตร t เป็นช่วงเวลาการเคลื่อนที่ หน่วย วินาที ที่เวลา $t = 10.0$ s จงหา

ก. การกระจัดของอนุภาค ข. ความเร็ว ค. ความเร่ง

ปัญหาท้าทาย

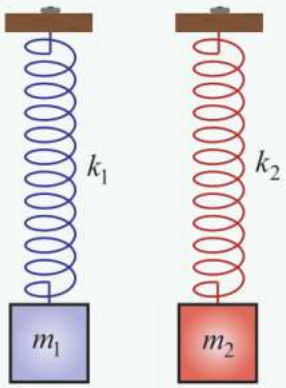
19. วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายด้วยความถี่ 5 รอบต่อวินาที ในแต่ละช่วงเวลา 1 วินาที วัตถุอยู่มีมุมเฟสต่างกันเท่าใด

20. ลูกเหล็กทรงกลมมวล 1 กรัม แกว่งแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายมีแอมพลิจูด 2 มิลลิเมตร ความเร่งที่จุดปลายของการแกว่งมีค่า 8×10^{3} เมตรต่อวินาที^{2}
    ก. จงหาความถี่ของการแกว่ง
    ข. จงหาความเร็วที่จุดสมดุล
    ค. จงเขียนสมการแสดงแรงที่กระทำต่อลูกเหล็กให้เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งและฟังก์ชันของเวลา
21. วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายรอบจุดสมดุล O ที่อยู่ระหว่างตำแหน่ง A และ B โดยใช้เวลา 1 วินาที ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง A ไป B ซึ่งอยู่ห่างกัน 20 เซนติเมตร ที่ตำแหน่ง A และ B วัตถุจะอยู่นิ่ง ขณะที่วัตถุผ่านตำแหน่ง C ซึ่งอยู่ห่างจาก O เป็นระยะ 6 เซนติเมตร วัตถุจะมีอัตราเร็วกี่เมตรต่อวินาที
22. มวล 2 กิโลกรัม ติดกับปลายลวดสปริง ดังรูป ก. ดึงสปริงให้ยืดออกแล้วปล่อยให้วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย บนพื้นระดับลื่น วัตถุเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ ใช้เวลา 1 วินาที ถ้ามีมวล m วางทับมวล 2 กิโลกรัมเดิมดังรูป ข. ทำให้วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายและครบ 1 รอบ ใช้เวลา 1.5 วินาที จงหามวล m



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 22

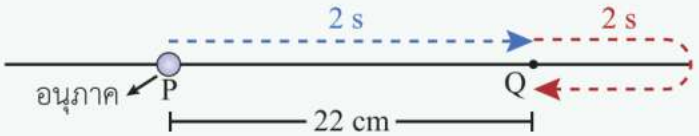
23. สปริงสองเส้นมีมวลน้อยมาก ปลายด้านหนึ่งยึดติดกับเพดาน ปลายอีกด้านหนึ่งมีมวล m_1 และ m_2 ติดไว้ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 23

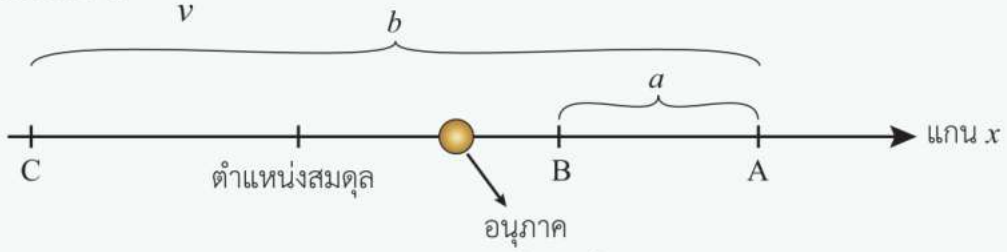
โดยค่าคงตัวสปริง k_1 เป็น 3 เท่าของค่าคงตัวสปริง k_2 และมวล m_1 เป็น 2 เท่าของมวล m_2 เมื่อออกแรงดึงมวล m_1 และ m_2 ให้สปริงยืดออกเล็กน้อยแล้วปล่อย มวล m_1 จะใช้เวลาในการสั่นครบรอบ เป็นกี่เท่าของมวล m_2

24. อนุภาคเคลื่อนที่ในแนววงกลมในระนาบระดับเคลื่อนที่ได้ 10 รอบใช้เวลา 3 วินาที เงาของอนุภาคเคลื่อนที่เป็นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยมีแอมพลิจูด 8.0 เซนติเมตร ณ ตำแหน่งที่เงาของอนุภาคมีอัตราเร็วสูงสุด มีขนาดของการกระจัดเท่าใด และอัตราเร็วสูงสุดมีค่าเท่าใด
25. อนุภาคหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ด้วยความถี่ 3 รอบต่อวินาที ถ้าแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ 2 เซนติเมตร อัตราเร็วสูงสุดของการเคลื่อนที่มีค่าเท่าใด
26. วัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีแอมพลิจูด 10 เซนติเมตร มีความถี่ 2 รอบต่อวินาที ณ ตำแหน่งที่มีการกระจัด 7 เซนติเมตร วัตถุจะมีความเร่งเท่าใด
27. อนุภาคหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย โดยใช้เวลา 2 วินาที ในการเคลื่อนที่ผ่านจุด P ไป Q ซึ่งอยู่ห่างกัน 22.0 เซนติเมตร ขณะผ่าน P และ Q อนุภาคมีอัตราเร็วเท่ากัน อีก 2 วินาที ต่อมาวัตถุเคลื่อนที่กลับมาที่ Q จงหาคาบและแอมพลิจูดของการเคลื่อนที่



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 27

28. A B C เป็นจุดบนเส้นตรงเส้นหนึ่ง อนุภาคหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายที่ตำแหน่ง B และ C อนุภาคมีอัตราเร็วเป็นศูนย์ จุด B และ C อยู่ห่างจาก A เป็นระยะ a และ b ตามลำดับ ที่จุดกึ่งกลางของ B และ C อนุภาคมีความเร็ว v จงแสดงให้เห็นว่า คาบของการเคลื่อนที่มีค่าเท่ากับ $\pi\dfrac{(b-a)}{v}$



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 28

29. ล้อวงกลมอันหนึ่งมีรัศมี 0.3 เมตร ที่ขอบล้อติดวัตถุไว้ก้อนหนึ่ง ล้อหมุนด้วยความถี่ 0.5 รอบต่อวินาที รอบแกนหมุนในแนวแกนซึ่งอยู่กับที่ ขณะนั้นมีแสงแดดตกกระทบตั้งฉากกับพื้นโลก ทำให้เงาของวัตถุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย
    ก. คาบของการเคลื่อนที่ของเงามีค่าเท่าใด
    ข. ความถี่ของการเคลื่อนที่ของเงามีค่าเท่าใด
    ค. แอมพลิจูดของการเคลื่อนที่ของเงามีค่าเท่าใด
    ง. จงเขียนสมการแสดงการกระจัดในการเคลื่อนที่ ณ เวลาต่าง ๆ กำหนดให้มุมเฟสเริ่มต้นเป็นศูนย์

30. เชือกเส้นที่หนึ่งยาว L เชือกเส้นที่สองยาว $2L$ ต่างมีมวลติดที่ปลายเชือก เมื่อทำให้มวลแกว่งแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ถ้าอัตราเร็วสูงสุดของมวลที่ปลายเชือกทั้งสองมีค่าเท่ากัน แอมพลิจูดของมวลที่ปลายของเชือกเส้นที่หนึ่งเป็นกี่เท่าของเส้นที่สอง

31. การกระจัดของอนุภาคหนึ่งที่เคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย เป็นฟังก์ชันของเวลาดังสมการ $x = (2\,\text{m})\sin\left(3\pi t + \frac{\pi}{4}\right)$ จงหา
    ก. การกระจัดที่เวลา $t = 2.0$ s
    ข. มุมเฟสที่เวลา $t = 2.0$ s
    ค. ความเร่งสูงสุด
    ง. สมการความเร็วที่เวลา t
    จ. สมการความเร่งที่เวลา t

32. อนุภาคหนึ่งมีการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายรอบจุด $x = 0$ ที่เวลา $t = 0$ อนุภาคมีการกระจัด 0.02 เมตร และความเร็วเป็นศูนย์ ถ้าความถี่ของการเคลื่อนที่ 0.25 เฮิรตซ์ จงหา
    ก. คาบ
    ข. ความถี่เชิงมุม
    ค. แอมพลิจูด
    ง. อัตราเร็วสูงสุด
    จ. อัตราเร็วที่เวลา $t = 3.0$ s

33. อนุภาคหนึ่งเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย มีการกระจัดดังสมการ $y = (1.0\text{m})\cos\left(10t - \frac{\pi}{6}\right)$ จงหา
    ก. ความถี่
    ข. การกระจัดสูงสุด
    ค. ความเร็วสูงสุด
    ง. ความเร่งสูงสุด
    จ. การกระจัด ความเร็วและความเร่งที่เวลา $t = 2.0$ s

บทที่ 9 คลื่น

ipst.me/8888

คลื่นเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่น คลื่นน้ำ คลื่นน้ำในทะเล คลื่นแผ่นดินไหว คลื่นสึนามิ คลื่นเสียง คลื่นมีความสัมพันธ์กับการถ่ายโอนพลังงาน เมื่อคลื่นแผ่ออกไปมีหลายสิ่งที่ใช้อธิบาย แต่ละสิ่งมีความสัมพันธ์กัน คลื่นมีหลายชนิดแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันแต่แสดงพฤติกรรมที่เหมือนกัน นักเรียนสามารถอธิบายพฤติกรรมเหล่านั้นได้อย่างไรซึ่งจะศึกษาได้จากบทนี้

คำถามสำคัญ

- คลื่นเกิดขึ้นได้อย่างไร มีกี่ชนิด แต่ละชนิดมีลักษณะสำคัญอย่างไร
- คลื่นต่อเนื่องบรรยายได้ด้วยสิ่งใด แต่ละสิ่งมีความสัมพันธ์กันอย่างไร
- คลื่นแสดงพฤติกรรมใดบ้าง แต่ละพฤติกรรมเป็นอย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

9.1 ธรรมชาติของคลื่น

1. อธิบายปรากฏการณ์คลื่น และลักษณะที่สำคัญของคลื่นชนิดต่าง ๆ
2. อธิบายองค์ประกอบต่าง ๆ ของคลื่น

9.2 อัตราเร็วของคลื่น

3. ระบุปัจจัยที่มีผลต่ออัตราเร็วคลื่นในตัวกลาง
4. อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว ความถี่และความยาวคลื่นและคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

9.3 หลักการที่เกี่ยวกับคลื่น

5. อธิบายการแผ่ของหน้าคลื่นโดยใช้หลักการของฮอยเกนส์
6. อธิบายการรวมกันของคลื่นโดยอาศัยหลักการซ้อนทับ

9.4 พฤติกรรมของคลื่น

7. ทดลอง สังเกต และอธิบายการสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบน การแทรกสอดของคลื่นผิวน้ำ รวมทั้งคำนวณปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง
8. สังเกตและอธิบายการเกิดคลื่นนิ่ง

ความรู้ก่อนเรียน

การเคลื่อนที่แนวตรง การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

คลื่นเป็นปรากฏการณ์ที่พบเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่นคลื่นน้ำในแม่น้ำ คลื่นน้ำในทะเล คลื่นเสียง คลื่นแสง เป็นต้น คลื่นมีส่วนสำคัญต่อการดำรงชีวิตของเราอย่างไร จะได้ศึกษาในบทนี้และบทอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยในบทนี้จะเริ่มศึกษาจากความหมายของคลื่น การเกิดและชนิดของคลื่น ส่วนประกอบของคลื่น และความสัมพันธ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง หลักการที่ใช้อธิบายคลื่น และพฤติกรรมของคลื่น เพื่ออธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของคลื่น และเป็นพื้นฐานในการศึกษาในบทต่อไป

9.1 ธรรมชาติของคลื่น

เมื่อขว้างก้อนหินลงน้ำ ก้อนหินกระทบผิวน้ำจะทำให้ผิวน้ำเปลี่ยนแปลงอย่างไร

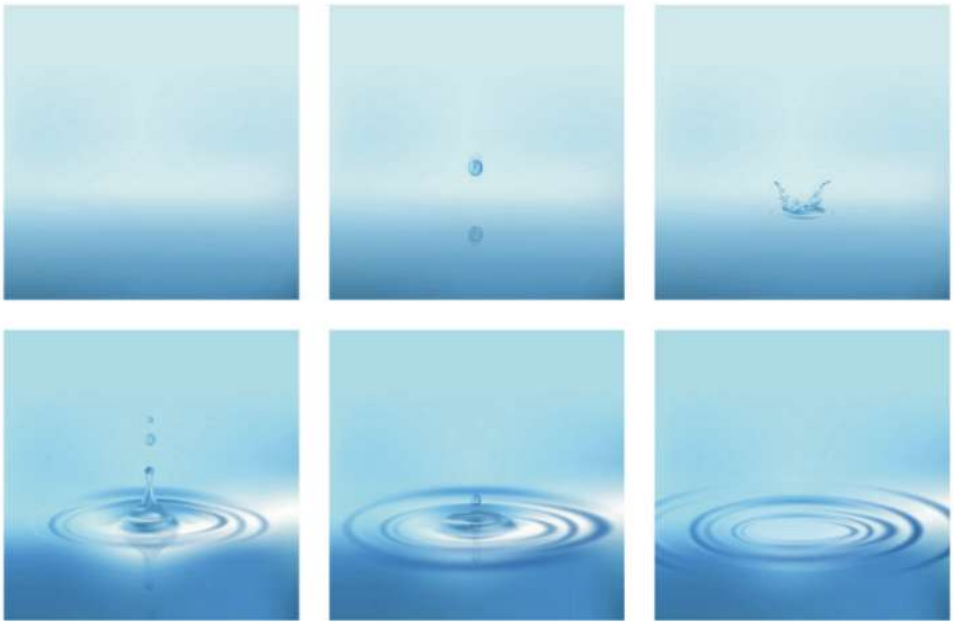
รูป 9.1 ขว้างก้อนหินลงน้ำและผลที่เกิดขึ้นเมื่อก้อนหินกระทบผิวน้ำ

เมื่อขว้างก้อนหินออกไปขณะที่ก้อนหินเคลื่อนที่ก้อนหินมีพลังงานกล เมื่อไปกระทบผิวน้ำที่อยู่นิ่งจะถ่ายเทพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอนุภาคน้ำ ทำให้อนุภาคน้ำตรงจุดที่ก้อนหินกระทบ เคลื่อนที่ขึ้นลงดึงให้อนุภาคน้ำส่วนที่อยู่รอบ ๆ เคลื่อนที่ขึ้นลงตามไปด้วย เกิดเป็นการส่งต่อพลังงานออกไปรอบ ๆ ทำให้เราเห็นเป็นวงระลอกน้ำแผ่ออกไปยังส่วนอื่น เมื่อวงของน้ำแผ่ออกไปพบกับใบไม้ที่ลอยอยู่ในน้ำ สามารถทำให้ใบไม้เคลื่อนที่ขึ้นลงตามจังหวะที่น้ำกระเพื่อมผ่านไปได้เนื่องจากใบไม้ได้รับพลังงานนั่นเองปรากฏการณ์ดังกล่าวนี้เป็นตัวอย่างของการเกิดคลื่นแบบหนึ่งซึ่งอธิบายปรากฏการณ์คลื่นได้ดังนี้

ปรากฏการณ์ที่มีการรบกวนเนื้อสาร ณ จุดใดจุดหนึ่ง การรบกวนนี้จะถูกส่งต่อไปยังจุดอื่นรอบ ๆ ทุกทิศทางพร้อมกับพาพลังงานไปด้วย โดยที่อนุภาคของเนื้อสารที่ถูกรบกวนไม่เคลื่อนที่ตามไปกับการถ่ายโอนพลังงาน ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **คลื่น** (wave)

9.1.1 การเกิดคลื่น

การทำให้เกิดคลื่นเป็นการรบกวนตัวกลาง เช่น การหยดน้ำจากที่สูงลงบนผิวน้ำที่อยู่นิ่ง จะเกิดคลื่นวงกลมแผ่ขยายออกไป ดังรูป 9.2



รูป 9.2 การหยดน้ำลงบนผิวน้ำที่อยู่นิ่ง

หยดน้ำที่ถูกปล่อยลงมาจากที่สูงมีพลังงานกล เมื่อกระทบกับผิวน้ำจะถ่ายโอนพลังงานให้แก่อนุภาคน้ำ เกิดการรบกวนน้ำตรงจุดกระทบ หยดน้ำเป็นแหล่งกำเนิดคลื่น ผิวน้ำประกอบด้วยอนุภาคน้ำเป็นตัวกลาง บริเวณที่แสดงให้เห็นการกระเพื่อมของน้ำซึ่งเกิดจากการรบกวนเป็นลูกคลื่น

ชวนคิด

คลื่นในสปริง คลื่นแผ่นดินไหว และคลื่นเสียง สิ่งใดเป็นแหล่งกำเนิดคลื่น และตัวกลางที่ทำให้เกิดคลื่นเหล่านี้

จากตัวอย่างการเกิดคลื่นข้างต้นประกอบด้วยสิ่งที่รบกวนตัวกลางคือแหล่งกำเนิดคลื่นและตัวกลางที่พลังงานถ่ายโอนผ่าน ทำให้อนุภาคของตัวกลางมีการสั่นแล้วถ่ายโอนพลังงานให้กับอนุภาคข้างเคียงต่อเนื่องกันไป ซึ่งต่างจากการถ่ายโอนพลังงานของวัตถุเคลื่อนที่

การถ่ายโอนพลังงานของวัตถุเคลื่อนที่และคลื่นมีข้อแตกต่างกันอย่างไรอธิบายได้ดังนี้

สำหรับวัตถุเคลื่อนที่จะนำพลังงานไปกับวัตถุเช่น ขว้างลูกบอลไปให้เพื่อน ลูกบอลจะเคลื่อนที่ไปยังมือของเพื่อน และจะนำพลังงานจลน์ไปกับลูกบอลด้วย

สำหรับคลื่นจะส่งพลังงานผ่านเนื้อสารหรืออนุภาคของตัวกลางโดยที่อนุภาคไม่ได้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับการส่งผ่านของพลังงานนั้น เช่น คนสองคนจับปลายสองข้างของเชือกเส้นเดียวกันแล้วดึงให้เชือกตึง จากนั้นคนแรกสะบัดเชือกขึ้นลง จะเกิดคลื่นเคลื่อนที่ไปตามเชือก โดยระหว่างที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านเชือกไปนั้น จะมีการส่งผ่านพลังงานไปตามการเคลื่อนที่ขึ้นลงตามส่วนต่าง ๆ ของเชือกจากปลายด้านที่สะบัดไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง แต่สังเกตว่า เชือกส่วนที่จับนั้นแม้มีการขยับขึ้นลงตามการขยับของมือทำให้อนุภาคของเชือกเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ไม่ได้เคลื่อนที่ตามไปกับคลื่นด้วย

จากคำอธิบายดังกล่าวแสดงว่า การถ่ายโอนพลังงานคลื่น พลังงานจะถูกถ่ายโอนผ่านอนุภาคในตัวกลาง และแม้ว่าอนุภาคในตัวกลางจะมีการเคลื่อนที่ แต่จะเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ณ ตำแหน่งหนึ่ง ๆ เท่านั้น โดยไม่ได้เคลื่อนที่ไปพร้อมกับการถ่ายโอนพลังงาน

9.1.2 ชนิดของคลื่น

คลื่นที่พบในธรรมชาติมีหลายลักษณะ ในหลายตัวกลาง เราสามารถแบ่งแยกชนิดของคลื่นโดยอาศัยตัวกลางได้ดังนี้

คลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานจึงจะแผ่ไปได้ เราเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า **คลื่นกล** (mechanical waves) ในขณะที่ส่งผ่านพลังงานจะทำให้อนุภาคของตัวกลางเคลื่อนที่กลับไปกลับมา ตัวอย่างของคลื่นกล ได้แก่ คลื่นในสปริง คลื่นแผ่นดินไหว คลื่นเสียง เป็นต้น

คลื่นที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการแผ่หรือเป็นคลื่นที่สามารถแผ่ไปในบริเวณที่เป็นสุญญากาศได้ เราเรียกคลื่นชนิดนี้ว่า **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** (electromagnetic waves) ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมาของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แผ่ออกไปพร้อม ๆ กัน ตัวอย่างของคลื่นชนิดนี้ เช่น แสงที่ตาเรามองเห็น คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ รังสีเอกซ์ เป็นต้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีพฤติกรรมเหมือนกับคลื่นกล ซึ่งรายละเอียดจะได้ศึกษาในบทเรียนต่อไป

นอกจากการแบ่งชนิดของคลื่นจากการอาศัยตัวกลางในการแผ่ของคลื่นแล้ว ยังมีการแบ่งชนิดของคลื่นวิธีอื่น ดังต่อไปนี้

กิจกรรมลองทำดู คลื่นในสปริง

จุดประสงค์

ศึกษาลักษณะของคลื่นในสปริง

วัสดุและอุปกรณ์

1. สปริง
2. เชือกหรือริบบิ้นยาวประมาณ 5 เซนติเมตร

วิธีทำกิจกรรม

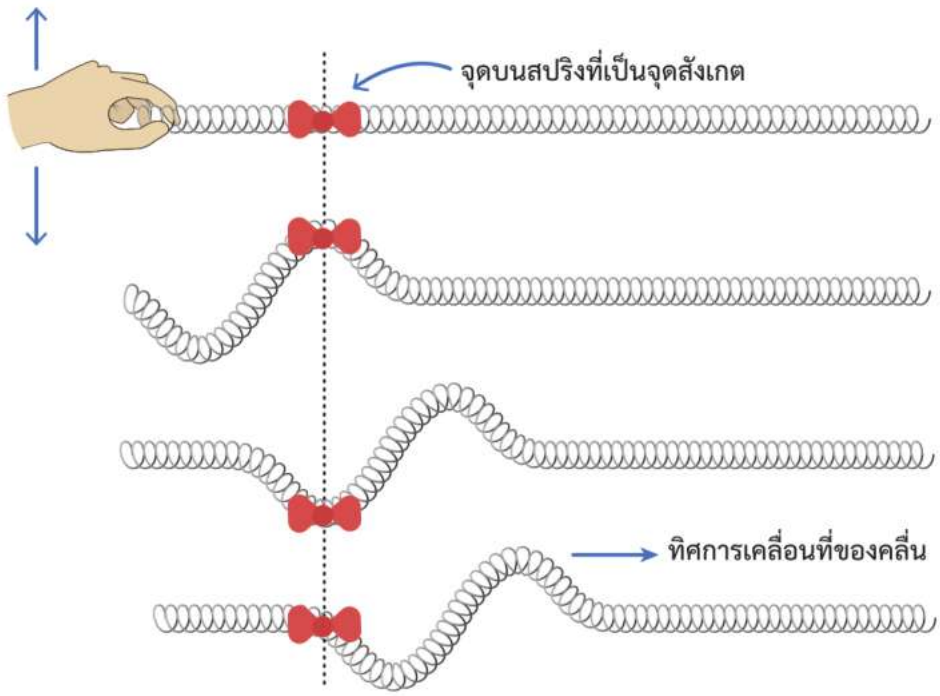
1. วางสปริงลงบนพื้นลื่น ดึงปลายสปริงทั้งสองด้านให้สปริงตึง ผูกเชือกหรือริบบิ้นที่ตำแหน่งหนึ่งบนสปริงเพื่อใช้เป็นจุดสังเกต
2. สะบัดปลายของสปริงด้านหนึ่งในทิศขนานกับพื้นและตั้งฉากกับตัวสปริง 1 ครั้ง
3. สังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นในสปริงและการเคลื่อนที่ของเชือกหรือริบบิ้น
4. อัดปลายสปริงด้านหนึ่งในแนวตามยาวสปริงและขนานกับพื้น 1ครั้ง
5. สังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นในสปริงและการเคลื่อนที่ของริบบิ้น

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ เมื่อสะบัดปลายสปริงในแนวตั้งฉากกับตัวสปริง เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เชือกหรือริบบิ้นเคลื่อนที่อย่างไร

☐ เมื่ออัดปลายสปริงในแนวตามยาวของตัวสปริง เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างไร เชือกหรือริบบิ้นเคลื่อนที่อย่างไร

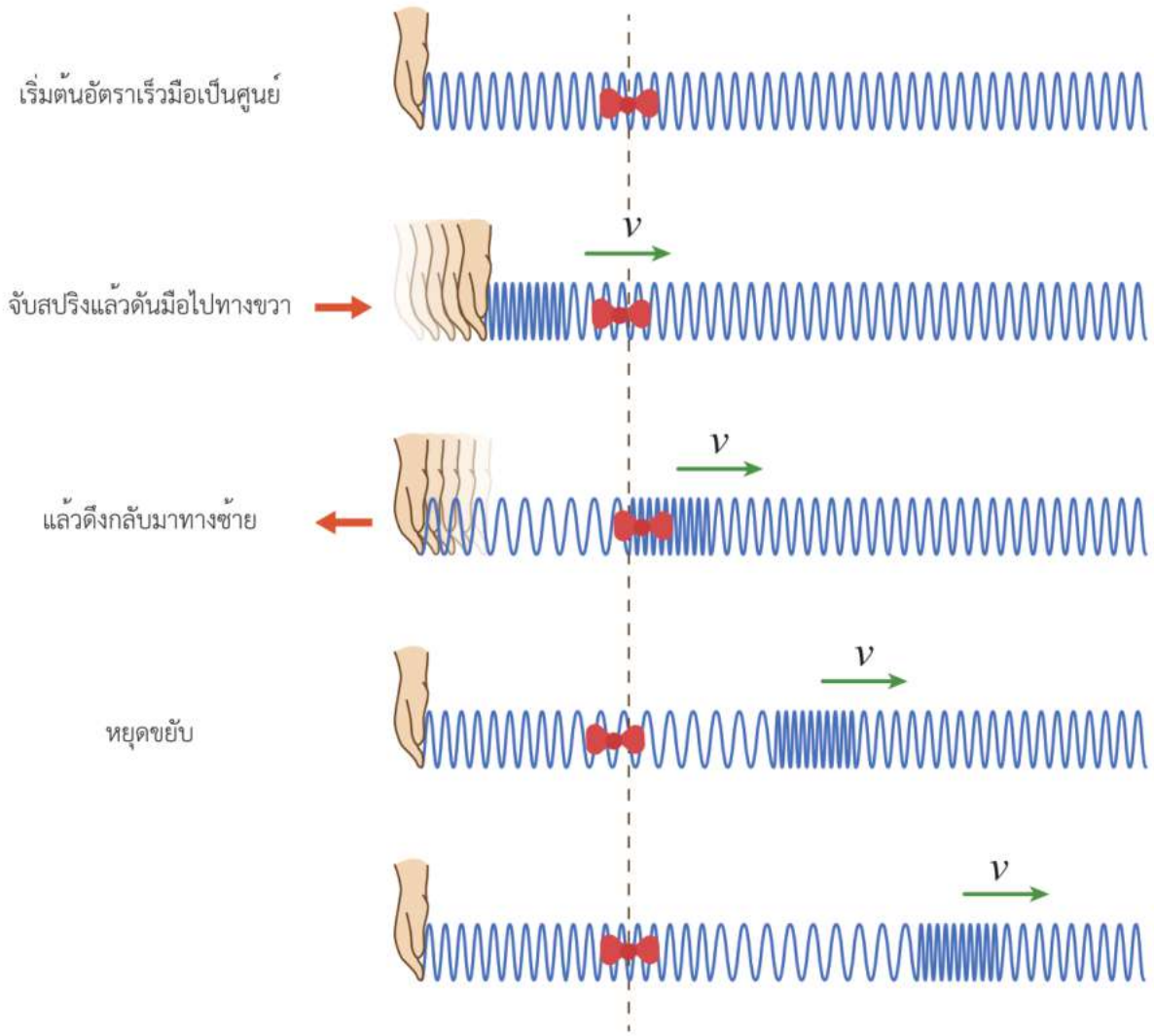
เมื่อดึงสปริงที่วางบนพื้นให้ตึง แล้วสะบัดปลายด้านหนึ่งตั้งฉากสปริง 1 ครั้ง ทำให้เกิดคลื่นในสปริงเคลื่อนที่จากปลายด้านที่สะบัดไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ดังรูป 9.3



รูป 9.3 การสะบัดปลายสปริง ทำให้เกิดคลื่นตามขวาง สังเกตการเคลื่อนที่ของริบบิ้น

พิจารณารูป 9.3 เมื่อสะบัดปลายสปริง จะเกิดคลื่นผ่านสปริงจากปลายด้านที่สะบัดไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของสปริง ขณะคลื่นผ่านจะรบกวนสปริงและทำให้อนุภาคของสปริงเคลื่อนที่ในทิศทางตั้งฉากกับทิศทางของคลื่นโดยสังเกตจากการเคลื่อนที่ของริบบิ้นเราเรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า **คลื่นตามขวาง (transverse waves)**

เมื่อดึงสปริงที่วางบนพื้นให้ตึง อัดปลายด้านหนึ่งของสปริงในแนวตามยาวของตัวสปริง 1 ครั้ง ทำให้เกิดคลื่นในสปริงเคลื่อนที่จากปลายด้านที่อัดไปยังปลายอีกด้านหนึ่ง ดังรูป 9.4



รูป 9.4 คลื่นในสปริงที่เกิดจากการอัดปลายสปริงในแนวเดียวกับตัวสปริง

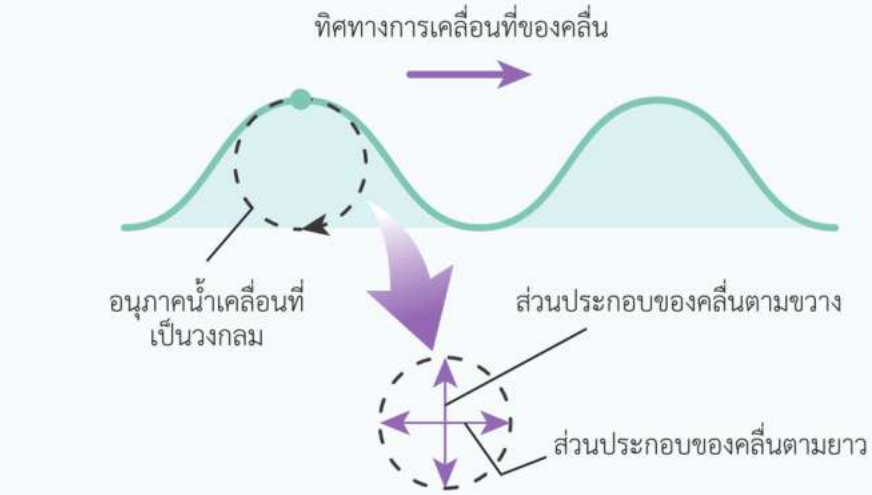
พิจารณารูป 9.4 เมื่ออัดปลายสปริง จะเกิดคลื่นผ่านสปริงจากปลายด้านที่อัดไปยังปลายอีกด้านหนึ่งของสปริง ขณะคลื่นผ่าน จะรบกวนสปริงและทำให้อนุภาคของสปริงเคลื่อนที่ในทิศทางขนานกับทิศทางของคลื่นโดยสังเกตจากการเคลื่อนที่ของริบบิ้น เราเรียกคลื่นลักษณะนี้ว่า **คลื่นตามยาว** (longitudinal waves)

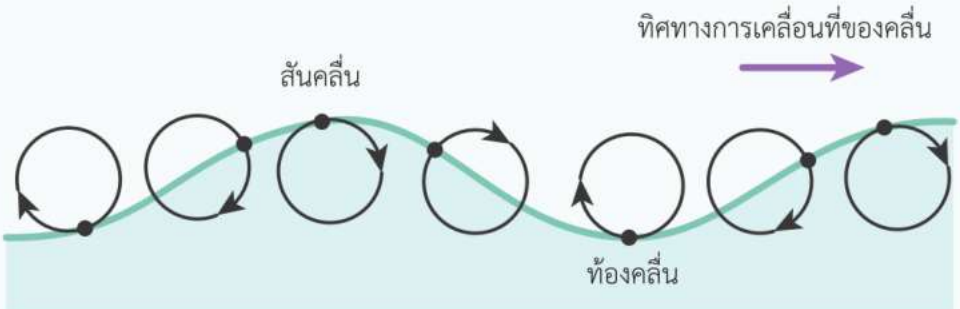
ความรู้เพิ่มเติม

แม้ว่าเราจะแยกคลื่นออกเป็นคลื่นตามขวางกับคลื่นตามยาวตามลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคตัวกลางเทียบกับการทิศการแผ่ของคลื่น แต่ก็มีคลื่นที่อนุภาคตัวกลางมีการเคลื่อนที่ที่มีทั้งในแนวเดียวกันกับแนวตั้งฉากกับการแผ่ไปของคลื่น เช่น ในกรณีคลื่นน้ำ ถ้าการรบกวนผิวน้ำเป็นในลักษณะเรียบง่าย คลื่นน้ำก็จะเป็นคลื่นตามขวาง แต่สำหรับคลื่นน้ำที่เกิดในทะเล คลื่นที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนกว่าคลื่นที่เกิดจากก้อนหินกระทบผิวน้ำ อนุภาคในคลื่นจะมีการเคลื่อนที่ได้ในทั้งสองแนว ทำให้คลื่นน้ำในทะเลมีส่วนประกอบที่เป็นทั้งคลื่นตามขวางและคลื่นตามยาว นอกจากนี้ในกรณีของคลื่นเสียงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นแก๊สหรือของเหลวคลื่นเสียงจะเป็นคลื่นตามยาว แต่ถ้าตัวกลางเป็นของแข็ง คลื่นเสียงก็จะมีทั้งส่วนที่เป็นคลื่นตามขวางและคลื่นตามยาวนักเรียนสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่

http://www.acs.psu.edu/drussell/demos/waves/wavemotion.html

คลื่นน้ำในทะเลมีส่วนประกอบที่เป็นทั้งคลื่นตามขวางและคลื่นตามยาว





นอกจากการแบ่งชนิดคลื่นตามการพิจารณาข้างต้น ยังสามารถแบ่งโดยใช้ช่วงเวลาที่รบกวนตัวกลางได้ดังนี้ จากคลื่นที่เกิดขึ้นตามการพิจารณาข้างต้นจะพบว่าเป็นคลื่นที่เกิดจากการรบกวนตัวกลางแบบไม่ต่อเนื่อง เรียกว่า **คลื่นดล** (pulses wave) ทำให้เกิดลูกคลื่นเพียงจำนวนหนึ่ง หรือเพียงบางส่วน ดังรูป 9.5

รูป 9.5 **แสดงรูปร่างคลื่นดล**

ถ้ามีการรบกวนตัวกลางแบบต่อเนื่อง จะทำให้เกิดคลื่นในแบบที่เรียกว่า **คลื่นต่อเนื่อง** (continuous waves) ซึ่งถ้ามีการรบกวนเป็นคาบสม่ำเสมอ ทำให้เกิดคลื่นดังรูป 9.6 โดยแบบที่เราเข้าใจและทำให้เกิดขึ้นได้ง่าย ก็คือแบบที่เรียกกว่า คลื่นแบบไซน์ ดังคลื่น A ในรูป 9.6

คลื่น A

รูป 9.6 **แสดงตัวอย่างของรูปร่างคลื่นต่อเนื่องแสดงรูปเป็นขบวน A: คลื่นแบบไซน์**

ความรู้เพิ่มเติม

คลื่นมีรูปร่างแบบอื่นได้อีก เช่น B: คลื่นสามเหลี่ยม, C: คลื่นฟันปลา และ D: คลื่นสี่เหลี่ยม ซึ่งไม่ได้พบเห็นในชีวิตประจำวัน แต่จะพบได้จากคลื่นสัญญาณไฟฟ้า

คลื่น B คลื่น C คลื่น D

9.1.3 ส่วนประกอบของคลื่น

เมื่อรบกวนตัวกลางให้เกิดคลื่นต่อเนื่องตามขวางทำให้ตัวกลางเปลี่ยนแปลงเกิดลูกคลื่นเคลื่อนที่ต่อเนื่องออกไปจากจุดที่รบกวนตัวกลาง เราสามารถศึกษาการเคลื่อนที่ของคลื่นจากการทำให้เกิดคลื่นรูปร่างแบบไซน์โดยการสะบัดปลายเชือกขึ้น-ลงแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย ดังรูป 9.7

กำหนดให้ T คือคาบของการสะบัดปลายเชือก

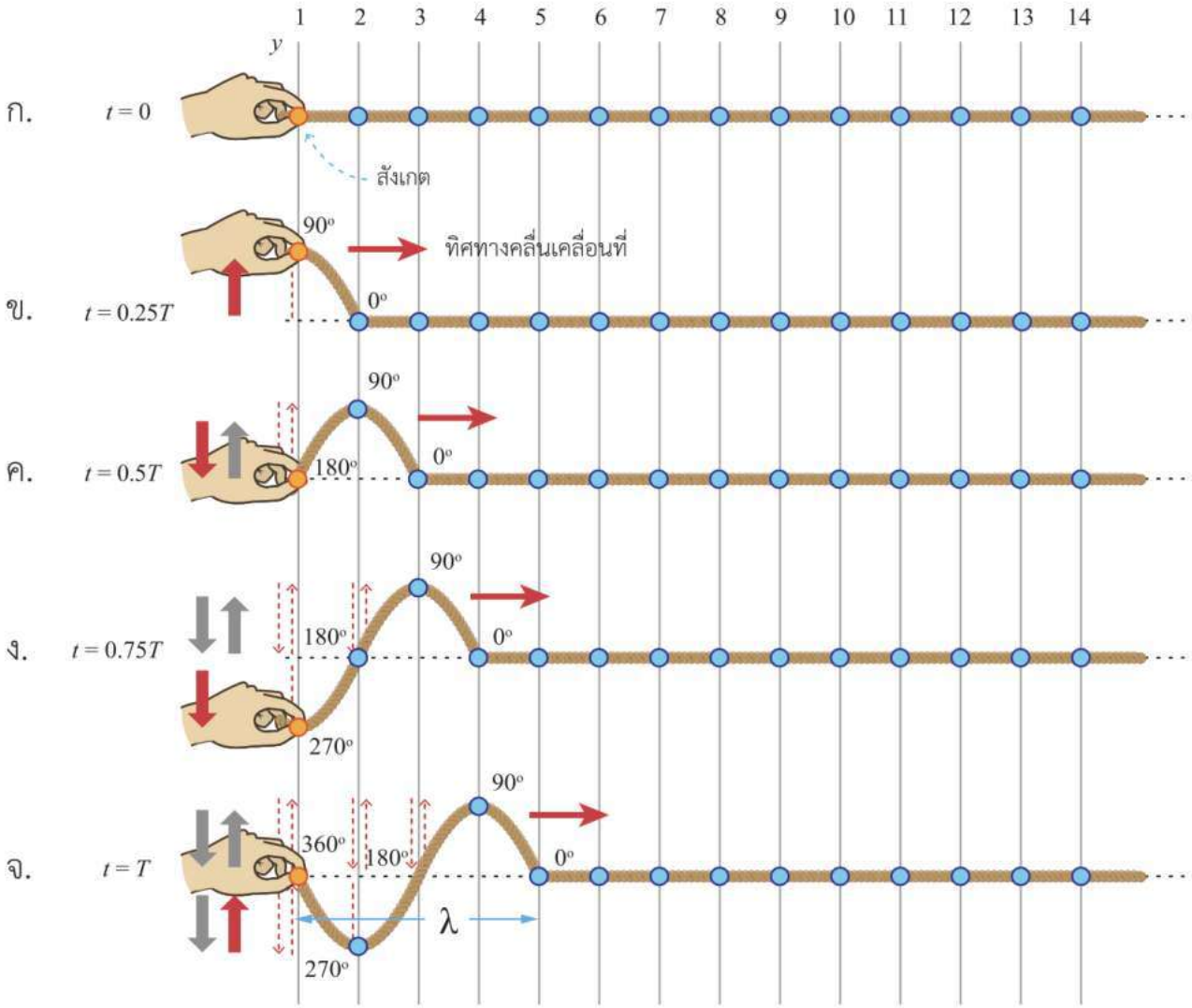
ที่เวลาเริ่มต้น $t = 0$ มือยังไม่สะบัดเชือก ยังไม่มีคลื่นแผ่ผ่านเชือก เชือกอยู่นิ่งในแนวนอน โดยทุกอนุภาคของเชือกอยู่ในตำแหน่งสมดุล ขณะนี้เฟสของการสั่นของอนุภาคตรงมือเป็น 0 องศา ดังรูป 9.7 ก.

ที่เวลา $t = 0.25T$ มือสะบัดเชือกขึ้นจนถึงตำแหน่งสูงสุดอนุภาคของเชือกที่ถูกรบกวนจะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลแผ่ออกไปจากมือ โดยแต่ละอนุภาคของเชือกที่ถูกรบกวนอยู่ในตำแหน่งต่างกันเรียงตัวกันเป็นหนึ่งส่วนสี่ของลูกคลื่น ขณะนี้เฟสของการสั่นของอนุภาคตรงมือเป็น 90 องศา ดังรูป 9.7 ข.

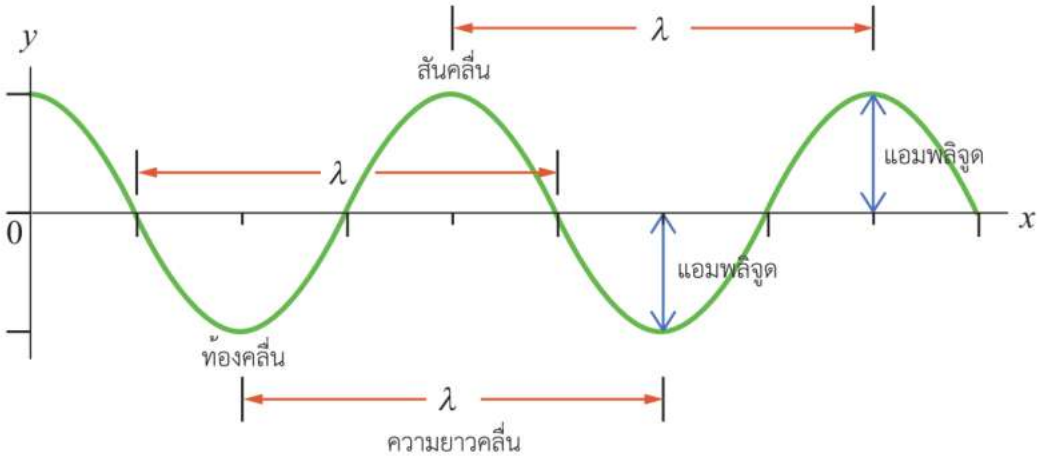
ที่เวลา $t = 0.5T$ มือเคลื่อนที่กลับมาที่ตำแหน่งสมดุล อนุภาคเชือกที่ถูกรบกวนจะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลแผ่ออกไปจากมือมากขึ้น โดยแต่ละอนุภาคของเชือกที่ถูกรบกวนอยู่ในตำแหน่งต่างกันเรียงตัวกันเป็นครึ่งลูกคลื่น ขณะนี้เฟสของการสั่นของอนุภาคตรงมือเป็น 180 องศา ดังรูป 9.7 ค.

ที่เวลา $t = 0.75T$ มือเคลื่อนที่ลงมาจนถึงตำแหน่งต่ำสุดอนุภาคของเชือกที่ถูกรบกวนจะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลแผ่ออกไปจากมือมากขึ้น โดยแต่ละอนุภาคของเชือกที่ถูกรบกวนอยู่ในตำแหน่งต่างกันเรียงตัวกันเป็นสามส่วนสี่ของลูกคลื่น ขณะนี้เฟสของการสั่นของอนุภาคตรงมือเป็น 270 องศา ดังรูป 9.7 ง.

ที่เวลา $t = T$ มือเคลื่อนที่กลับขึ้นไปยังตำแหน่งสมดุลซึ่งครบ 1 รอบ อนุภาคของเชือกที่ถูกรบกวนจะเคลื่อนที่ออกจากตำแหน่งสมดุลแผ่ออกไปจากมือมากขึ้น อนุภาคของเชือกที่ถูกรบกวนเคลื่อนที่อยู่ในตำแหน่งที่ต่างกันเรียงตัวกันเป็นคลื่น 1 ลูก ขณะนี้เฟสของการสั่นของอนุภาคตรงมือเป็น 360 องศา หรือเริ่มต้น 0 ของรอบถัดไป ขณะเดียวกันอนุภาคถัดไปที่คลื่นเดินทางถึงจะมีเฟสเปลี่ยนแปลงทำนองเดียวกับอนุภาคตรงมือดังรูป 9.7 จ.



รูป 9.7 รูปร่างของคลื่นตามขวางแบบฮาร์มอนิกในเชือกที่เวลา t ต่าง ๆ หลังจากเชือกเริ่มถูกรบกวนด้วยมือที่กระตุกขึ้นลงแบบฮาร์มอนิก โดยกำหนดให้ T เป็นเวลา 1 คาบ

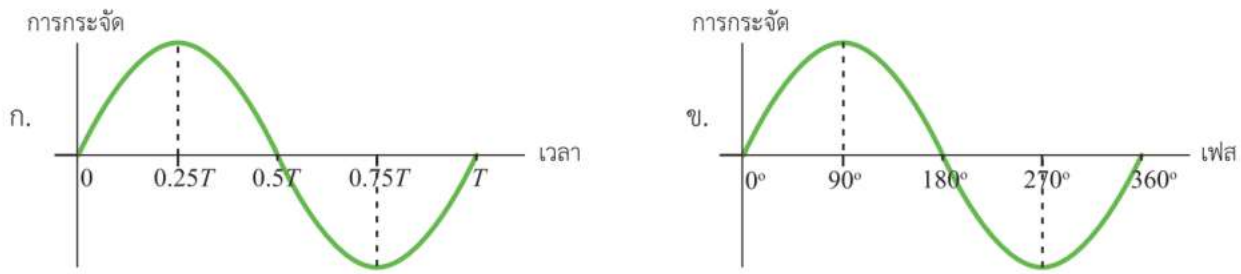


รูป 9.8 ส่วนประกอบของคลื่น

จากการพิจารณาการแผ่คลื่นตามขวางข้างต้น พบว่าจำนวนลูกคลื่นที่เกิดขึ้นเท่ากับจำนวนรอบของการสะบัดมือ ดังนั้นความถี่ของคลื่นเท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิดคลื่นนั่นเองและอนุภาคของเชือกมีการสั่นในแนวตั้งฉากกับทิศทางของคลื่น โดยแอมพลิจูดของการสั่นของอนุภาคของเชือกเป็นแอมพลิจูดของคลื่น จุดที่อนุภาคของเชือกเคลื่อนที่ขึ้นไปได้สูงสุดเรียกว่า **สันคลื่น** (crest) และจุดที่อนุภาคของเชือกเคลื่อนที่ลงไปได้ต่ำสุดเรียกว่า **ท้องคลื่น** (trough) ดังรูป 9.8 ระยะความยาวคลื่น 1ลูก เท่ากับระยะระหว่างสันคลื่นถัดกัน หรือระหว่างท้องคลื่นถัดกัน เรียกว่า **ความยาวคลื่น** (wavelength , λ)

เมื่อพิจารณาอนุภาคเชือกในคลื่นพบว่า อนุภาคเชือกมีการเคลื่อนที่ขึ้นลงแบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย เช่นเดียวกับมือ เราสามารถใช้เฟสของอนุภาคที่สั่นมาอธิบายเฟสของคลื่น ดังรูป 9.7 จ. จะเห็นว่าเมื่อมือขยับครบ 1 รอบจะมีคลื่นเคลื่อนออกไปได้ 1 ลูก หรือได้ระยะทางเป็น 1 ความยาวคลื่น โดยตำแหน่งอนุภาคที่ห่างจากมือเป็นระยะ 1 ความยาวคลื่น มีเฟสต่างกับมือ 360 องศา อาจกล่าวได้ว่าสองตำแหน่งบนคลื่นที่อยู่ห่างกันเท่ากับความยาวคลื่น มีเฟสต่างกัน 360 องศา หรือ 2π เรเดียน

เมื่อพิจารณาอนุภาคหนึ่งที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในตัวกลาง จะพบอนุภาคตัวกลางมีการเปลี่ยนแปลงการกระจัดกับเวลา และการกระจัดกับเฟส ณ เวลาต่างๆ มีลักษณะดังกราฟรูป 9.9 ซึ่งพิจารณาได้ว่า

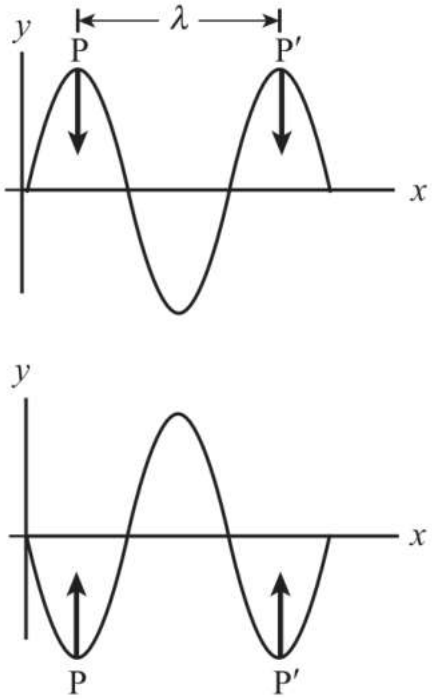


รูป 9.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ก. การกระจัดกับเวลา และ ข. การกระจัดกับเฟสของอนุภาคตัวกลาง

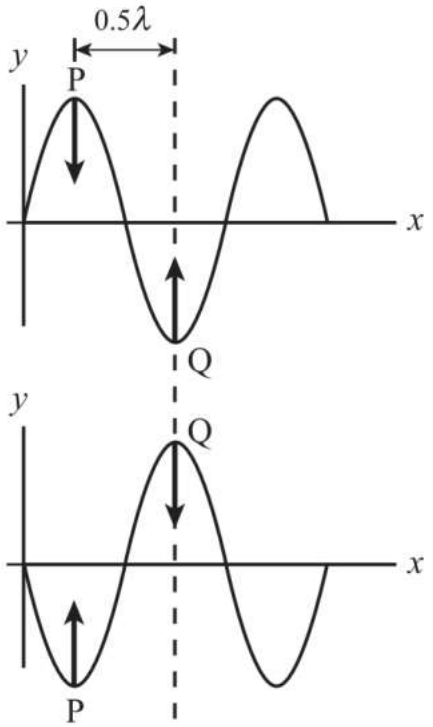
ขณะเมื่อเวลาเริ่มต้นอนุภาคมีการกระจัดเท่ากับ 0 และเฟสเท่ากับ 0° (0 เรเดียน)
เมื่อเวลา 0.25 T อนุภาคมีการกระจัดเท่ากับ A มีเฟสเท่ากับ 90° ($\frac{\pi}{2}$ เรเดียน)
เมื่อเวลา 0.5 T อนุภาคมีการกระจัดเท่ากับ 0 มีเฟสเท่ากับ 180° (π เรเดียน)
เมื่อเวลา 0.75 T อนุภาคมีการกระจัดเท่ากับ $-A$ มีเฟสเท่ากับ 270° ($\frac{3\pi}{2}$ เรเดียน)
เมื่อเวลา T อนุภาคมีการกระจัดเท่ากับ 0 มีเฟสเท่ากับ 360° (2π เรเดียน)

เมื่อพิจารณาอนุภาคที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนลูกคลื่น แต่ละอนุภาคที่มีเฟสต่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของ 2π หรืออยู่ห่างกันเป็นจำนวนเต็มเท่าของ λ จะมีการสั่นขึ้นลงพร้อมกัน เช่น P กับ P' ดังรูป 9.10 ก. เรียกว่ามีเฟสตรงกัน ส่วนอนุภาคมีสั่นขึ้นลงไม่พร้อมกัน เรียกว่ามีเฟสต่างกัน

ในกรณีเฟสต่างกัน หากอนุภาคมีเฟสต่างกันเป็น π 3π 5π ... หรืออยู่ห่างกันเป็น 0.5λ 1.5λ 2.5λ... มีการสั่นขึ้นลงในทิศตรงข้ามกัน เช่น จุด P กับ Q ดังรูป 9.10 ข เรียกว่ามีเฟสตรงข้ามกัน



รูป 9.10 ก ภาพด้านข้างของคลื่นผิวน้ำที่เวลาหนึ่ง แสดงจุดที่มีเฟสตรงกัน



รูป 9.10 ข ภาพด้านข้างของคลื่นผิวน้ำที่เวลาหนึ่ง แสดงจุดที่มีเฟสตรงข้ามกัน

จากรูปข้างต้นจะพิจารณาลูกคลื่นตามแนวแกน x ได้ว่า
ถ้าตำแหน่งบนคลื่นอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง Δx ตำแหน่งทั้งสองจะมีเฟสต่างกัน $\Delta\phi$ ตามสมการ

$$\Delta\phi = \Delta x\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \qquad (9.1)$$

ตัวอย่าง 9.1 คลื่นกลหนึ่งมีความถี่ 100 เฮิรตซ์แผ่ออกไปด้วยอัตราเร็ว 343 เมตรต่อวินาที

ก. จุด 2 จุดบนคลื่นที่อยู่ห่างกัน เป็นระยะ 60.0 เซนติเมตร จะมีเฟสต่างกันกี่องศา

ข. จุด 2 จุดบนคลื่นที่มีเฟสต่างกัน 90 องศาจะอยู่ห่างกันเท่าใด

ก. แนวคิด สามารถหาความยาวคลื่นจากสมการ $v = f\lambda$ และหาเฟสต่างกันได้จากสมการ 9.1

วิธีทำ เราทราบว่าจุดบนคลื่นที่อยู่ห่างกันเท่ากับความยาวคลื่นจะมีเฟสต่างกัน 360 องศา ดังนั้น เราต้องหาก่อนว่าความยาวคลื่นของคลื่นนี้มีค่าเท่าใด เนื่องจากคลื่นมีความถี่ 100 เฮิรตซ์ แสดงว่าเป็นคลื่นต่อเนื่อง ดังนั้นเราหาความยาวคลื่นได้จากความสัมพันธ์

$$v = f\lambda$$

หรือ

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343\,\text{m/s}}{100\,\text{Hz}} = \frac{343\,\text{m/s}}{100\,\text{s}^{-1}} = 3.43\,\text{m}$$

ดังนั้น จุด 2 จุด บนคลื่นที่อยู่ห่างกัน เท่ากับ $\lambda = 3.43\,\text{m}$ จะมีเฟสต่างกัน 360 องศา ทำให้เราคำนวณได้ว่า จุด 2 จุดที่อยู่ห่างกัน $\Delta x = 60.0\,\text{cm}$ จะมีเฟสต่างกันเท่ากับ

$$\Delta\phi = 360^\circ\left(\frac{\Delta x}{\lambda}\right) = 360^\circ\left(\frac{60.0\,\text{cm}}{343\,\text{cm}}\right) = 63.0^\circ$$

ตอบ จุด 2 จุดบนคลื่นที่อยู่ห่างกัน เป็นระยะ 60.0 เซนติเมตร จะมีเฟสต่างกัน 63 องศา

ข. แนวคิด ระยะห่างของจุด 2 จุดบนคลื่นที่มีเฟสต่างกัน 90 องศา หาได้จาก ความสัมพันธ์ $\Delta x = \lambda\left(\frac{\Delta\phi}{360^\circ}\right)$

วิธีทำ

$$\Delta x = \lambda\left(\frac{\Delta\phi}{360^\circ}\right) = 3.43\,\text{m}\left(\frac{90^\circ}{360^\circ}\right) = 0.858\,\text{m}$$

ตอบ จุด 2 จุดบนคลื่นที่มีเฟสต่างกัน 90 องศาจะอยู่ห่างกัน 0.858 เมตร

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 9.1

รูปข้างล่างนี้แสดงรูปร่างคลื่นดลในเส้นเชือกที่กำลังเคลื่อนที่ไปทางซ้าย

1. อนุภาคของเชือกตรงจุด A และจุด B กำลังจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางใด (ซ้าย ขวา ลง หรือขึ้น)
2. คลื่นกลต่างจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างไร

9.2 อัตราเร็วของคลื่น

เมื่อมีการรบกวนตัวกลางจากแหล่งกำเนิดคลื่น ทำให้เกิดคลื่นแผ่ผ่านตัวกลางออกไปรอบ ๆ แหล่งกำเนิดคลื่น อัตราเร็วของคลื่นที่แผ่ออกไปคำนวณหาได้อย่างไร ขึ้นอยู่กับสิ่งใดและมีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบของคลื่นอย่างไร จะได้ศึกษาดังต่อไปนี้

9.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว ความถี่และความยาวคลื่น

สำหรับคลื่นต่อเนื่องที่แผ่ผ่านตัวกลาง อัตราเร็วของคลื่นคำนวณหาได้เช่นเดียวกับการหาอัตราเร็วทั่วไป คือ

$$v = \frac{s}{t}$$

สำหรับอนุภาคหนึ่งที่เวลาผ่านไป 1 คาบ อนุภาคสั่นครบ 1 รอบ กล่าวได้ว่าเกิดคลื่นผ่านอนุภาคนั้น 1 ลูก คลื่นเคลื่อนที่ไปได้ระยะทางที่เรียกว่า ความยาวคลื่น λ ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วคลื่น v ความยาวคลื่น λ และคาบ T ได้ตามสมการ

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

เนื่องจากเราทราบว่า คาบสัมพันธ์กับความถี่ ตามสมการ

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

เราจึงได้ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่นของคลื่นต่อเนื่องเป็น

$$v = f\lambda \qquad (9.2)$$

ความสัมพันธ์นี้ใช้อธิบายอัตราเร็วคลื่นในตัวกลางใดตัวกลางหนึ่งเท่านั้น หมายถึง ในตัวกลางหนึ่งเมื่อเปลี่ยนค่าความถี่ของคลื่น ความยาวคลื่นจะเปลี่ยนแปลงตาม แต่ผลคูณของความยาวคลื่นและความถี่ยังคงเท่ากับอัตราเร็วเดิม

ตัวอย่าง 9.2 สำหรับคลื่นกลต่อเนื่องที่แผ่ผ่านตัวกลางด้วยความถี่ 262 เฮิรตซ์ และความยาวคลื่น 1.29 เมตร

ก. คลื่นนี้มีอัตราเร็วเท่าใด

ข. คลื่นนี้จะใช้เวลานานเท่าใด จึงจะเคลื่อนที่ได้ระยะทาง 91.4 เมตร

ค. คาบของคลื่นนี้มีค่าเท่าใด

แนวคิด ก. หาอัตราเร็วจากสมการ $v = f\lambda$

ข. หาเวลาจากสมการ $v = \frac{s}{t}$

ค. หาคาบจากสมการ $T = \frac{1}{f}$

วิธีทำ ก. จากโจทย์ เราทราบค่าความถี่ f มีค่า 262 เฮิรตซ์ และความยาวคลื่น λ มีค่า 1.29 เมตร เราสามารถหาอัตราเร็วคลื่นได้จากความสัมพันธ์ $v = f\lambda = (262\,\text{Hz})(1.29\,\text{m}) = 338\,\text{m/s}$

ข. เนื่องจากคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางด้วยอัตราเร็วคงตัว ดังนั้นเราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็ว v ระยะทางที่เคลื่อนที่ได้ d กับเวลา t ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ ได้ดังสมการ $t = \frac{s}{v}$ ดังนั้นเมื่อเราต้องการหาเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่เราจึงได้ว่า

$$t = \frac{s}{v} = \frac{91.4\,\text{m}}{338\,\text{m/s}} = 0.270\,\text{s}$$

ค. เราสามารถหาคาบได้จาก $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{262\,\text{Hz}} = 0.00382\,\text{s}$

ตอบ ก. คลื่นมีอัตราเร็ว เท่ากับ 338 เมตรต่อวินาที

ข. คลื่นใช้เวลานาน 0.270 วินาที

ค. คาบของคลื่นมีค่า 0.00382 วินาที

ตัวอย่าง 9.3 เรือลำหนึ่งจอดอยู่นิ่งที่จุดหนึ่งบนผิวน้ำ ซึ่งมีคลื่นต่อเนื่องเคลื่อนที่ผ่านทำให้เรือเคลื่อนที่ขึ้นลง ถ้าระยะระหว่างจุดสูงสุดของคลื่นที่อยู่ถัดกันมีค่าเป็น 12.0 เมตร และคลื่นมีอัตราเร็ว 4.3 เมตรต่อวินาที จะใช้เวลานานเท่าใด ที่เรือจะเคลื่อนที่จากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด

แนวคิด จุดสูงสุดคือ สันคลื่น จุดต่ำสุดคือท้องคลื่น จะใช้เวลาเคลื่อนที่ระหว่างสองจุดนี้เท่ากับ $\frac{T}{2}$

วิธีทำ จากข้อมูลที่โจทย์ให้มา ทำให้เราทราบว่าคลื่นนี้มีความยาวคลื่นเท่ากับ 12.0 เมตร และมีอัตราเร็วคลื่นเท่ากับ 4.3 m/s ซึ่งเราสามารถคำนวณหาค่าความถี่ของคลื่นได้เท่ากับ

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{4.3\,\text{m/s}}{12.0\,\text{m}} = 0.36\,\text{s}^{-1}$$

ซึ่งก็หมายความว่า คาบของคลื่นมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{0.36\,\text{s}^{-1}} = 2.8\,\text{s}$$

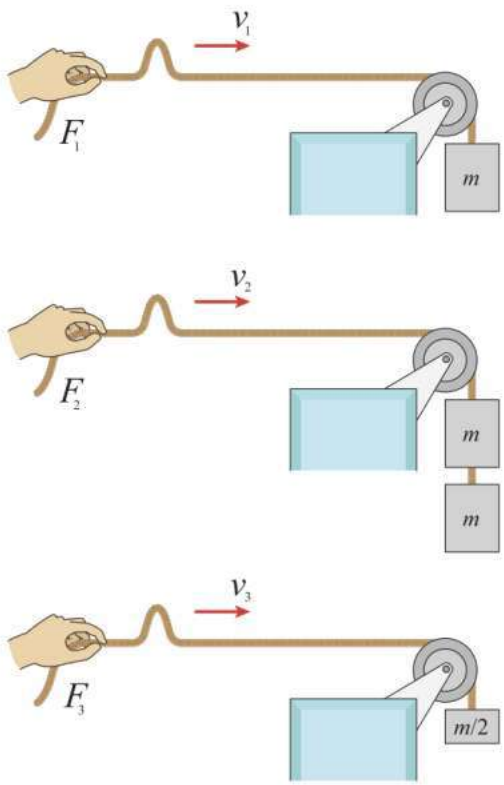
โดยค่าคาบของคลื่นนี้ เท่ากับคาบของการเคลื่อนที่ขึ้นลงของอนุภาคตัวกลางด้วย หมายความว่าเวลานี้คือเวลาที่เรือเคลื่อนที่ขึ้นลง 1 รอบ

ตอบ ช่วงเวลาที่เรือเคลื่อนที่ขึ้นลงจากจุดสูงสุดถึงต่ำสุดเมื่อคลื่นกำลังเคลื่อนที่ผ่านจึงมีค่าเท่ากับ ครึ่งหนึ่งของคาบ คือ 1.4 วินาที

9.2.2 อัตราเร็วของคลื่นในตัวกลาง

อัตราเร็วของคลื่นมีค่าขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน เช่น กรณีของคลื่นในเส้นเชือกที่มีแอมพลิจูดไม่ใหญ่จนเกินไป คลื่นจะมีอัตราเร็วขึ้นอยู่กับขนาดของแรงดึงในเส้นเชือกและค่าความหนาแน่นเชิงเส้น (มวลต่อหน่วยความยาว) ของเส้นเชือก กล่าวคือ เชือกยิ่งตึงคลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านไปได้เร็ว และสำหรับเชือกที่มีแรงดึงในเส้นเชือกเท่ากัน คลื่นจะเคลื่อนที่ผ่านเชือกเส้นที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นสูงได้ช้ากว่า เคลื่อนที่ผ่านเชือกเส้นที่มีค่าหนาแน่นเชิงเส้นน้อยกว่า

ตัวอย่าง 9.4 พิจารณาเชือก 3 เส้นที่เหมือนกัน ปลายด้านหนึ่งยึดติดกับตุ้มน้ำหนักที่มีมวลต่างกันผ่านรอก ดังแสดงในรูป ปลายอีกด้านหนึ่ง มีมือดึงอยู่ เมื่อมือที่จับเชือกแต่ละเส้น สะบัดขึ้นลง 1 ครั้ง จะเกิดคลื่นดลเคลื่อนที่ไปตามเชือก จงเรียงลำดับอัตราเร็วคลื่น



แนวคิด อัตราเร็วขึ้นอยู่กับความหนาแน่นเชิงเส้น และความตึงของเชือก โดยความตึงของเชือกขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่แขวนปลายเชือก

วิธีทำ เชือกทั้งสามเส้นเหมือนกันหมด ดังนั้น เราสรุปว่า ทั้งสามกรณีเชือกมีความหนาแน่นเชิงเส้นเท่ากันหมด แต่มวลที่ถ่วงเชือกแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้แรงดึงในเส้นเชือกแต่ละเส้นไม่เท่ากัน เราสามารถเรียงลำดับขนาดของแรงดึงในเส้นเชือกได้ตามลำดับของมวลถ่วง ดังนี้

$$F_2 > F_1 > F_3$$

เนื่องจากอัตราเร็วของคลื่นในเส้นเชือกที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นเท่ากันหมด จะขึ้นกับแรงดึงในเส้นเชือกเท่านั้น กล่าวคือ แรงดึงในเส้นเชือกมาก คลื่นจะยิ่งแผ่ไปได้เร็ว ดังนั้นเราจึงสรุปว่า

$v_2 > v_1 > v_3$

ข้อเท็จจริงที่สำคัญที่ต้องเน้นให้ตระหนักอีกครั้งคือ ไม่ว่าจะสะบัดปลายเชือกขึ้นลง ด้วยความถี่เท่าใดก็ตาม หากแรงดึงในเส้นเชือกและความหนาแน่นเชิงเส้นของเชือกมีค่าสม่ำเสมอและคงตัว อัตราเร็วของคลื่นจะมีค่าเท่าเดิม ซึ่งเป็นสมบัติของตัวกลางที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน อัตราเร็วของคลื่นจะมีค่าไม่ขึ้นกับความถี่ของการสะบัดนี้แต่อย่างใด สมการ (9.2) อาจทำให้คิดว่า v ขึ้นกับความถี่ แต่ไม่ได้เป็นเช่นนั้น เพราะอัตราเร็วคลื่นมีค่าคงตัวเมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางเดิม ดังนั้นเมื่อเพิ่มความถี่ของการสะบัดเชือกขึ้นลงอย่างต่อเนื่อง สิ่งที่เกิดก็คือ จำนวนลูกคลื่นต่อหน่วยเวลาเพิ่มขึ้น และความยาวคลื่นก็จะมีค่าน้อยลง แต่ถ้าสะบัดด้วยความถี่ที่น้อยลง จำนวนลูกคลื่นต่อหน่วยเวลาลดลง ทำให้ความยาวคลื่นมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้ผลคูณของความถี่กับความยาวคลื่นมีค่าคงเดิมกล่าวคือ เราอาจพิจารณาเขียนสมการที่ (9.2) ในรูปของ $\lambda = \frac{v}{f}$ เพื่อแสดงว่าความยาวคลื่นแปรผกผันกับความถี่ โดยค่าคงที่ของการแปรผัน คือ อัตราเร็วคลื่นนั่นเอง

ความรู้เพิ่มเติม

ในกรณีของคลื่นเสียง อัตราเร็วของคลื่นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นกับความยืดหยุ่นของตัวกลางที่เสียงเคลื่อนที่ผ่าน กล่าวคือ โดยทั่วไป เสียงจะแผ่ผ่านของแข็งซึ่งมีความยืดหยุ่นน้อยได้เร็วกว่าแผ่ผ่านของเหลว และเร็วกว่าแผ่ผ่านแก๊สซึ่งมีความยืดหยุ่นมากกว่า

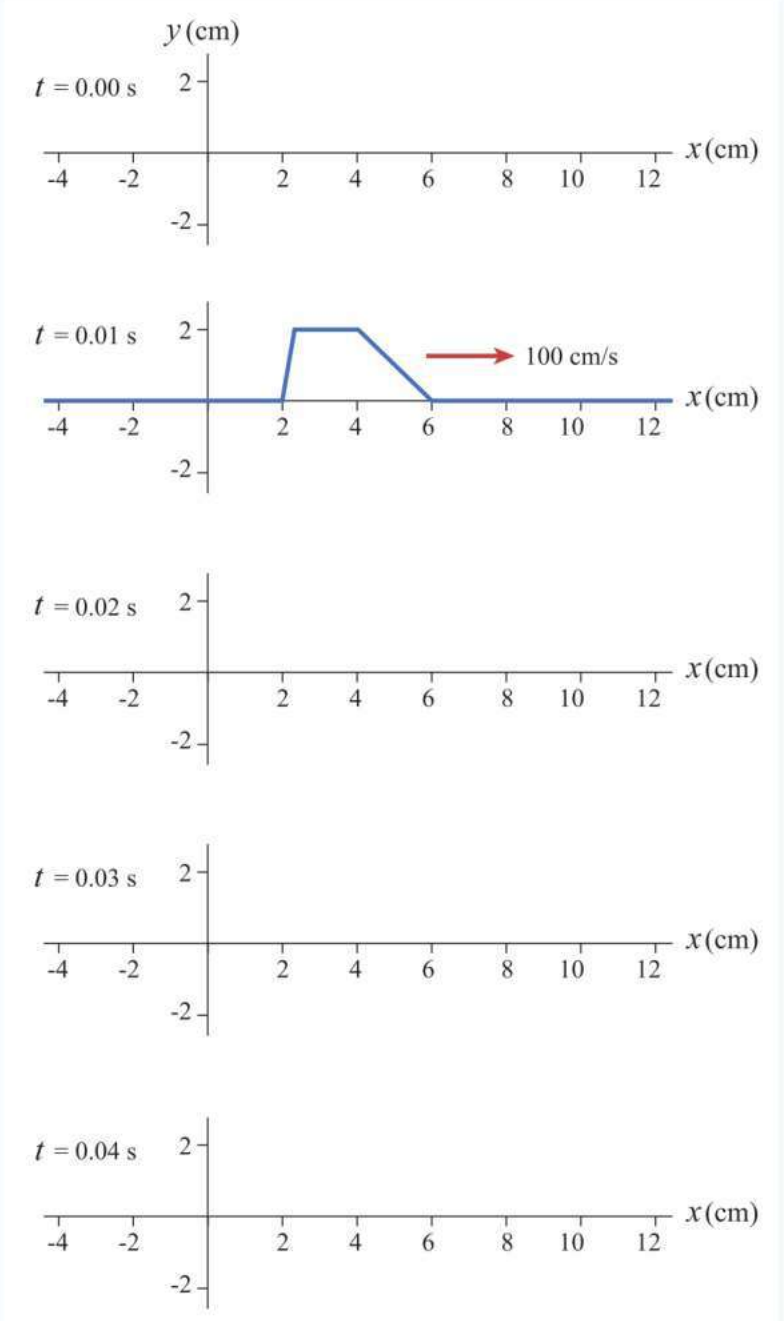
ในการสะบัดเชือกให้เกิดคลื่นที่มีแอมพลิจูดขนาดต่างกัน การที่คลื่นมีแอมพลิจูดต่างกันแสดงว่าขณะที่สะบัดเชือกการกระจัดสูงสุดที่มีค่าต่างกัน คลื่นที่มีแอมพลิจูดมากเกิดจากการสะบัดด้วยการกระจัดที่มีค่ามาก และคลื่นที่มีแอมพลิจูดน้อยเกิดจากการสะบัดด้วยการกระจัดที่มีค่าน้อย การสะบัดเชือกด้วยแอมพลิจูดสูงกว่าหมายความว่า ต้องทำงานหรือให้พลังงานแก่เชือกมากกว่าการสะบัดเชือกด้วยแอมพลิจูดต่ำกว่า งานที่เราทำนี้ถูกถ่ายโอนในรูปของพลังงานไปพร้อมกับการเคลื่อนที่ของคลื่น แสดงว่าค่าพลังงานที่คลื่นถ่ายโอนไปนั้นสัมพันธ์กับแอมพลิจูดคลื่น กล่าวคือ ยิ่งแอมพลิจูดมาก พลังงานที่คลื่นพาไปก็จะมากด้วย

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 9.2

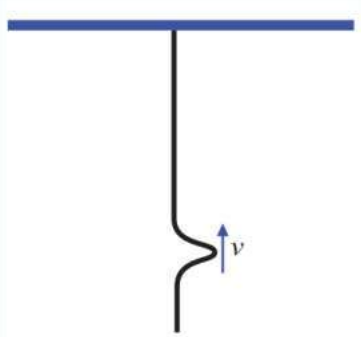
1. คลื่นดลในตัวกลางหนึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็ว 100 เซนติเมตรต่อวินาที โดยรูปร่างคลื่นที่เวลา $t = 0.01$ s เป็นดังรูป

   ก. จงวาดรูปร่างคลื่นที่เวลา $t = 0.00$ s, 0.02 s, 0.03 s และ 0.04 s

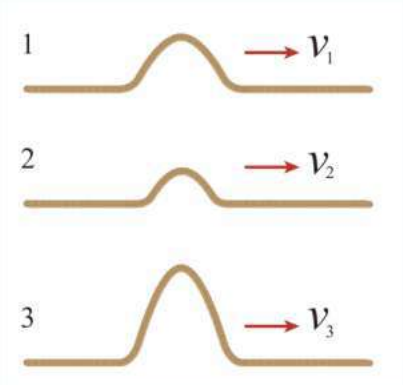
   ข. ระหว่างเวลา $t = 0.01$ s กับ $t = 0.03$ s คลื่นดลนี้ เคลื่อนที่ได้เป็นระยะทางเท่าไร



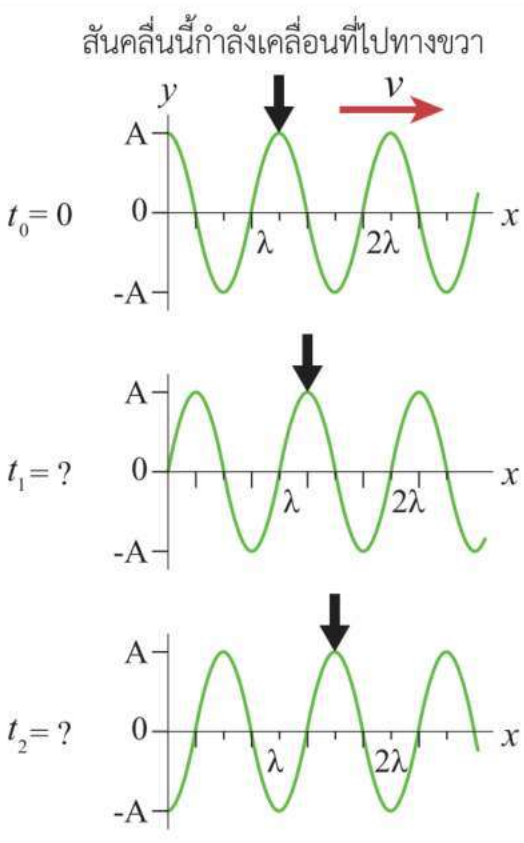
2. พิจารณาเชือกหนาที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นสม่ำเสมอ ถูกนำมาห้อยลงมาจากเพดานดังรูป เมื่อเราสะบัดปลายเชือกด้านล่างให้เกิดคลื่นดล คลื่นดลนี้จะเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแนวเชือก ขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ขึ้นนั้น อัตราเร็วของคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ถ้าเปลี่ยน คลื่นดลนี้เคลื่อนที่เร็วขึ้นหรือช้าลงก่อนที่จะชนเพดาน



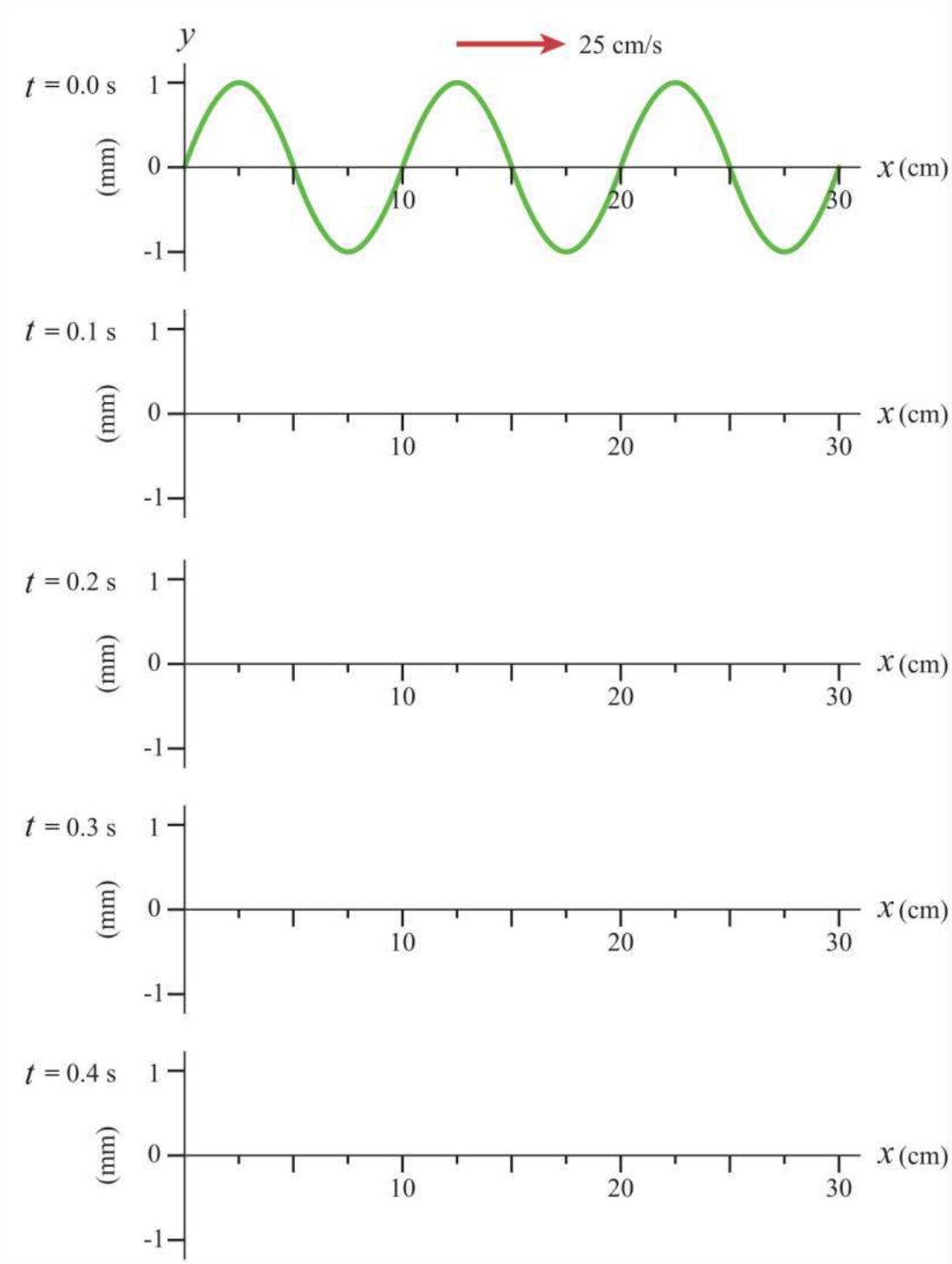
3. พิจารณาเชือกเส้นหนึ่งที่มีแรงดึงเชือกเท่ากันตลอดเส้น ถ้าเราทำให้มีคลื่นดลเคลื่อนที่ผ่านเชือกเส้นนี้ใน 3 ลักษณะที่ต่างกัน ดังแสดงในรูปด้านขวา คลื่นหมายเลขใดจะมีอัตราเร็วมากที่สุด และคลื่นหมายเลขใดจะมีพลังงานมากที่สุด



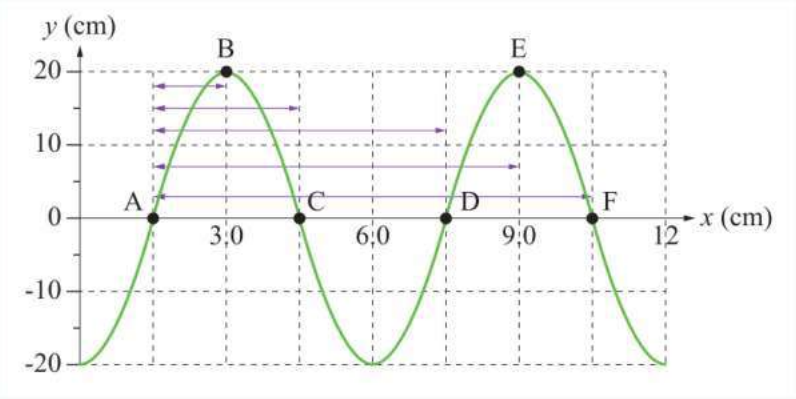
4. รูปด้านขวาแสดงคลื่นฮาร์มอนิกเคลื่อนที่ไปทางขวา โดยรูปบนสุดแสดงที่เวลาเริ่มต้น t_0=0 ลูกศรสีดำชี้ตำแหน่งของจุดสูงสุดของคลื่นจุดหนึ่งซึ่งเลื่อนที่ไปทางขวา จงระบุว่า เวลา t_1, t_2 มีค่าเป็นกี่เท่าของคาบคลื่น T



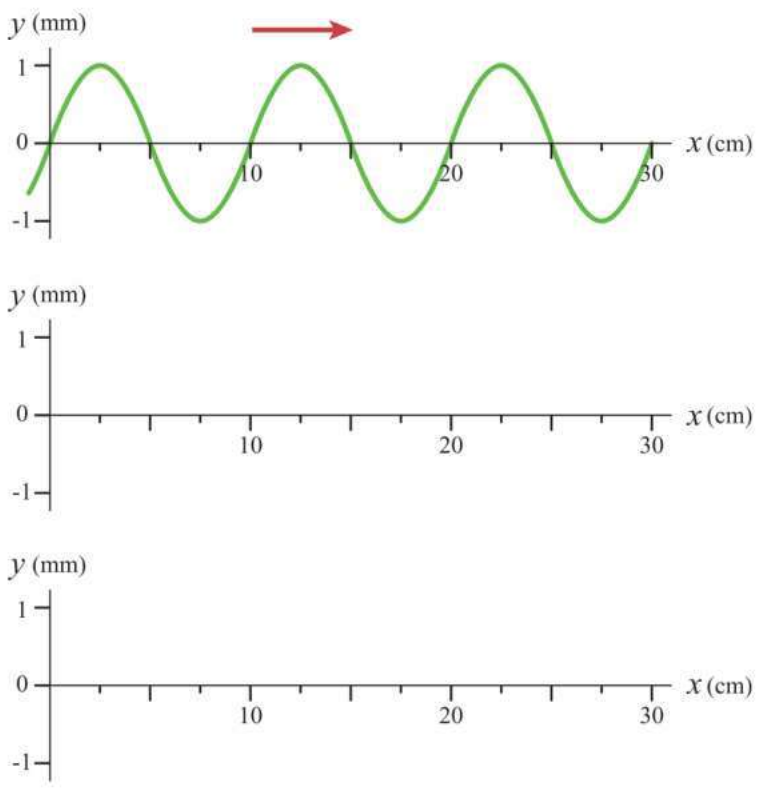
5. พิจารณาคลื่นรูปไซน์ด้านล่างนี้ โดยเป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปทางขวาด้วยอัตราเร็ว 25 เซนติเมตรต่อวินาที จงวาดรูปคลื่นไซน์นี้ที่เวลาอื่น ๆ ตามระบุในรูป



6. พิจารณาคลื่นรูปไซน์ด้านล่าง จงหาว่า จุด BCD E และ F ห่างจากจุด A เป็นระยะในแนวนอนเท่ากับกี่เท่าของความยาวคลื่นนี้ และมีค่าเฟสต่างจากจุด A เท่าใด

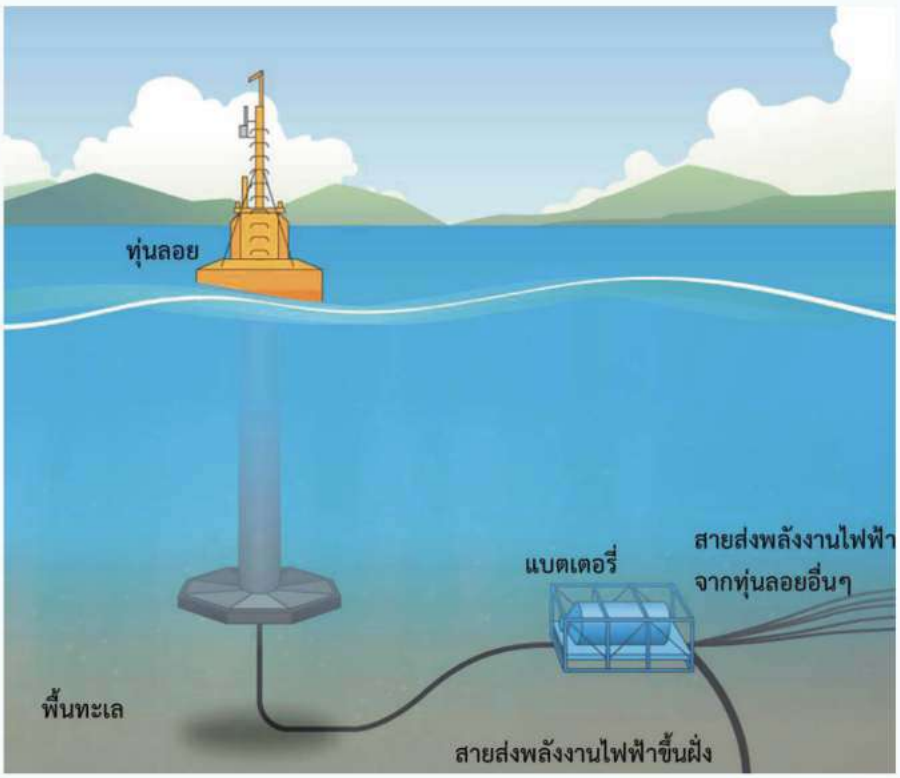


7. เมื่อทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือกที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ และวัดค่าความยาวคลื่นของคลื่นนี้ได้ 1.2 เมตร ถ้าทำให้เกิดคลื่นในเส้นเชือกเดิมนี้ โดยคลื่นมีความถี่ 60 เฮิรตซ์ แทนอัตราเร็วและความยาวคลื่นนี้จะมีค่าเปลี่ยนไป หรือไม่ อย่างไร
8. สันคลื่นกับท้องคลื่นที่อยู่ถัดกันมีเฟสต่างกันกี่องศา
9. พิจารณาคลื่นรูปไซน์ด้านล่างนี้ จงวาดรูปของคลื่นไซน์อีก 2 คลื่น โดยคลื่นแรกมีความยาวคลื่นเท่ากันกับคลื่นด้านบนสุดแต่มีแอมพลิจูดเป็นครึ่งหนึ่ง และคลื่นที่สองมีแอมพลิจูดเท่ากันกับคลื่นบนสุดแต่มีความยาวคลื่นเป็นครึ่งหนึ่ง



ความรู้เพิ่มเติม

เราสามารถนำพลังงานจากคลื่นในมหาสมุทรมาเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ในรูปด้านล่างแสดงทุ่นลอยที่เปลี่ยนพลังงานคลื่นเป็นพลังงานไฟฟ้า เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านทุ่นลอย จะทำให้ทุ่นลอยมีการเคลื่อนที่ขึ้นลงและซ้ายขวา และทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยแต่ละทุ่นลอยจะส่งพลังงานไฟฟ้ามาเก็บไว้ที่แบตเตอรี่ และมีสายไฟส่งพลังงานไฟฟ้าขึ้นฝั่ง



9.3 หลักการที่เกี่ยวกับคลื่น

การศึกษาเรื่องคลื่นที่ผ่านมาพบว่าคลื่นมีหลายชนิด แต่ละชนิดมีลักษณะแตกต่างกัน แต่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่างๆ ด้วยหลักการเดียวกัน ซึ่งจะได้ศึกษาดังต่อไปนี้

9.3.1 หลักการของฮอยเกนส์

คริสเตียน ฮอยเกนส์ ได้อธิบายการแผ่ของคลื่นผ่านตัวกลางซึ่งเป็นพื้นฐานที่สามารถนำไปใช้อธิบายพฤติกรรมของคลื่นได้เป็นอย่างดี ทำให้เข้าใจปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับคลื่น เช่น การสะท้อน การหักเห การเลี้ยวเบนได้ หลักการอธิบายนี้จึงใช้กันต่อ ๆ มาและเรียกว่า หลักการของฮอยเกนส์

การศึกษาหลักการของฮอยเกนส์ในที่นี้อาศัยการอธิบายการแผ่ของคลื่นผ่านผิวน้ำ จากกิจกรรม 9.1 คลื่นผิวน้ำ

กิจกรรม 9.1 คลื่นผิวน้ำ

จุดประสงค์

สังเกตอธิบายหน้าคลื่นและทิศทางของคลื่นผิวน้ำ

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดถาดคลื่น 1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำพร้อมสายไฟ 1 ชุด
3. กระดาษขาว 1 แผ่น

วิธีทำกิจกรรม

1. ตั้งถาดคลื่นให้อยู่ในแนวระดับ เติมน้ำลงในถาดในระดับความลึกที่พอเหมาะ สังเกตระดับน้ำในถาดคลื่นต้องมีระดับความลึกเท่ากันทุกด้าน ถ้าไม่เท่ากันให้ปรับระดับจนเท่ากัน
2. วางกระดาษขาวใต้ถาดคลื่น
3. ต่อสายไฟฟ้าจากหม้อแปลงโดยใช้ความต่างศักย์ 12 โวลต์ เข้ากับหลอดไฟ เปิดสวิตซ์ให้หลอดไฟติดสว่าง
4. ใช้ปลายดินสอจุ่มที่ผิวน้ำ 1 ครั้งบริเวณกลางถาดคลื่น สังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นบนกระดาษขาว
5. ทำการทดลองซ้ำในข้อ 4. แต่เปลี่ยนจากดินสอเป็นไม้บรรทัด
6. ปรับคานกำเนิดคลื่น ให้ปุ่มกำเนิดคลื่นจุ่มลงบริเวณผิวน้ำ 1 ปุ่ม เปิดมอเตอร์ให้คานสั่น ปรับมอเตอร์ให้หมุนด้วยความเร็วพอเหมาะสังเกตเห็นสิ่งที่เกิดขึ้นบนกระดาษขาว
7. หมุนปุ่มกำเนิดคลื่นขึ้นให้พ้นน้ำ ปรับคานกำเนิดคลื่นให้สัมผัสผิวน้ำแทน แล้วทำการทดลองซ้ำในข้อ 6

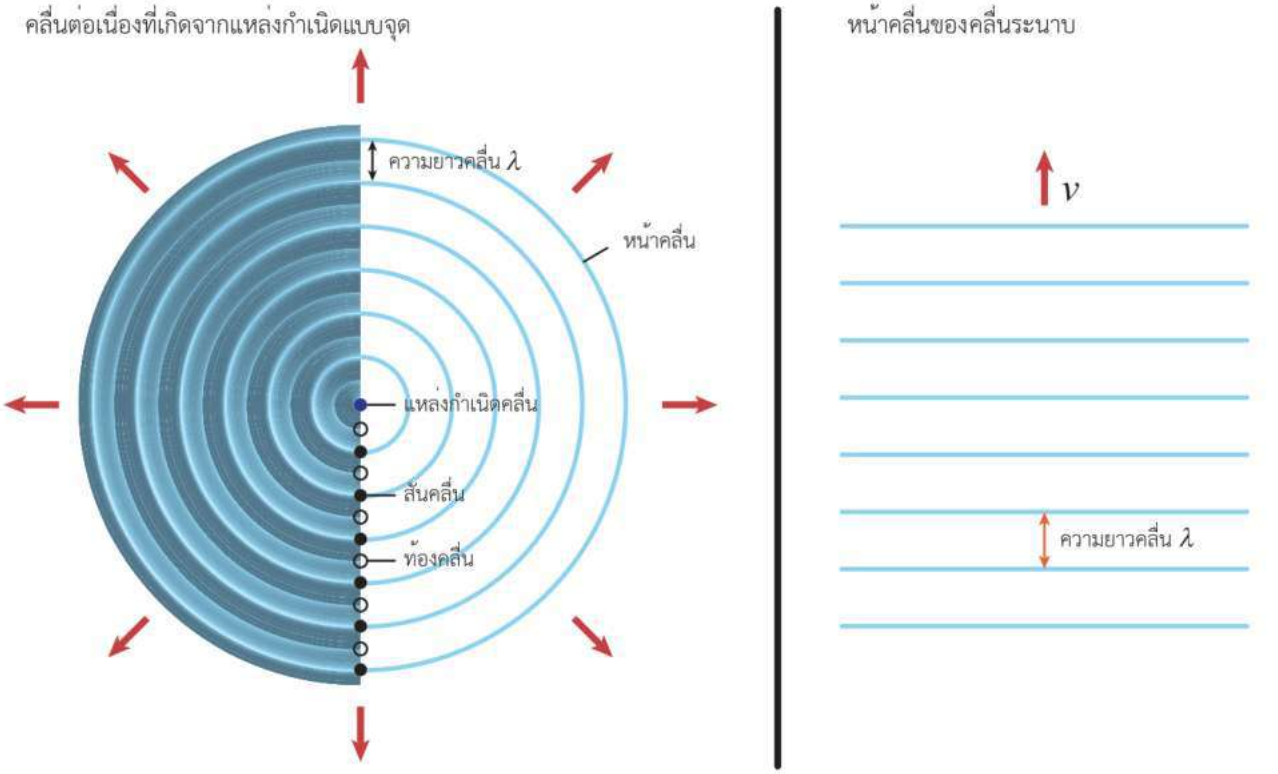
คำถามท้ายกิจกรรม

- □ เมื่อใช้ปลายดินสอ และไม้บรรทัดจุ่มลงในน้ำ 1 ครั้ง ภาพที่เกิดขึ้นบนกระดาษขาวเป็นอย่างไร
- □ แถบสีดำบนกระดาษขาวที่เกิดขึ้นจากการรบกวนผิวน้ำอย่างต่อเนื่อง เคลื่อนที่อย่างไร

เมื่อรบกวนผิวน้ำ 1 ครั้ง จะเกิดแถบสว่างสลับกับแถบมืดเพียงแถบเดียวเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิดคลื่นตามรูปร่างของแหล่งกำเนิด ถ้ารบกวนผิวน้ำอย่างต่อเนื่องจะเกิดแถบสว่างและมืดสลับกันแผ่ออกไปอย่างต่อเนื่องโดยมีระยะห่างระหว่างแถบพอ ๆ กัน สิ่งต่าง ๆ ที่สังเกตเห็น อธิบายได้ดังนี้

พิจารณาคลื่นต่อเนื่องที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแบบจุด คลื่นที่แผ่ออกไปตัวกลางดังรูป 9.11 ก. ซึ่งแสดงภาพของคลื่นน้ำที่มองจากด้านบน โดยแหล่งกำเนิดเป็นปุ่มที่เคาะผิวน้ำด้วยความถี่ค่าหนึ่ง เส้นโค้งที่เห็นเป็นส่วนหนึ่งของวงกลมที่มีรัศมีต่างกัน ทุกจุดที่อยู่บนเส้นวงกลมเดียวกัน เป็นจุดของสันคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดพร้อม ๆ กัน จึงมีเฟสตรงกัน และเราเรียกเส้นโค้งนี้ว่า **หน้าคลื่น** (wave-front) หน้าคลื่นที่อยู่ถัดกันจะมีระยะห่างกันเท่ากับความยาวคลื่น ทิศทางการแผ่ไปของคลื่นแทนด้วยลูกศรในรูป โดยทิศทางนี้ตั้งฉากกับหน้าคลื่นเสมอ

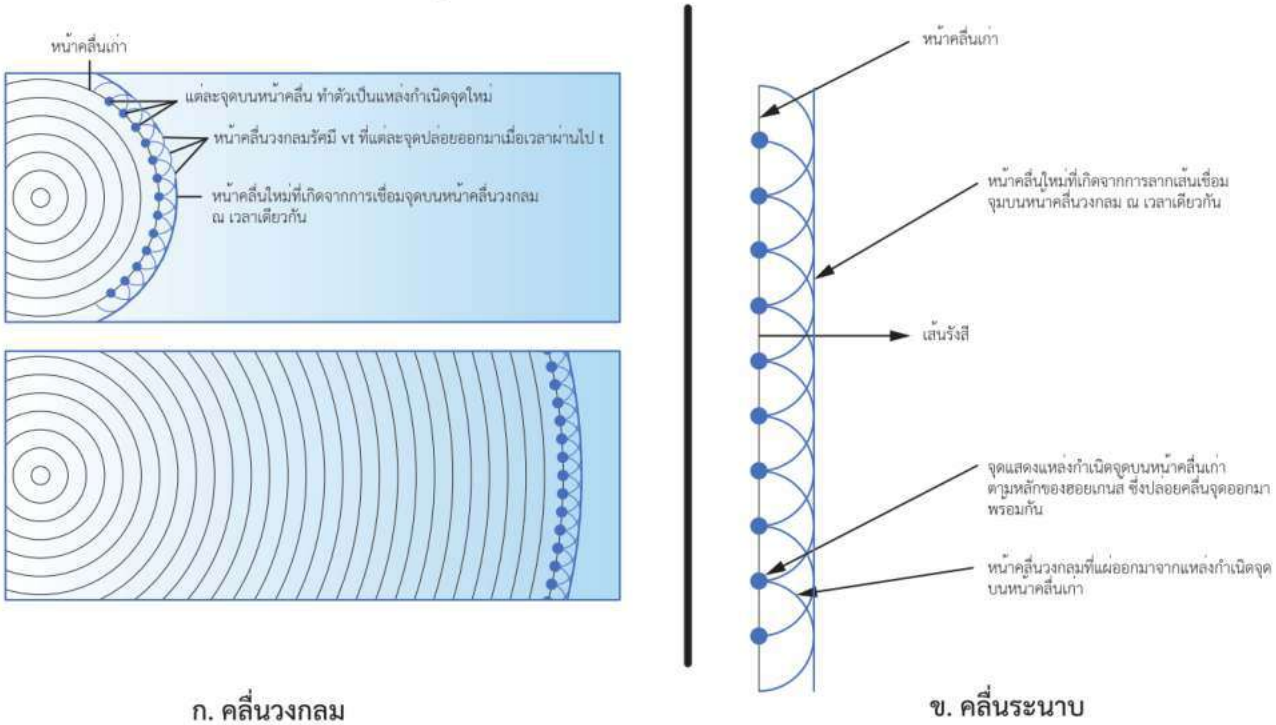
เมื่อใช้แหล่งกำเนิดเป็นคานกำเนิดคลื่นยาวตรงแทน หน้าคลื่นที่แผ่ออกไปจะเป็นเส้นตรง หรือที่เราเรียกว่า **คลื่นระนาบ** (plane waves) ดังแสดงในรูป 9.11 ข. และก็เป็นเช่นเดียวกันกับคลื่นที่เกิดจากแหล่งกำเนิดแบบจุด ทิศทางการแผ่ของคลื่นระนาบจะตั้งฉากกับหน้าคลื่น และระยะระหว่างหน้าคลื่นที่อยู่ถัดกันจะเท่ากับความยาวคลื่น



ก. คลื่นต่อเนื่องที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นจุด ข. คลื่นระนาบ

รูป 9.11 แสดงภาพที่มองจากมุมบนขณะที่แหล่งกำเนิดคลื่นทำให้เกิดคลื่น

หลักการของฮอยเกนส์ (Huygens' principle) กล่าวว่า แต่ละจุดบนหน้าคลื่นเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด ที่ทำให้เกิดหน้าคลื่นรูปวงกลมใหม่ซึ่งส่งคลื่นออกไป โดยคลื่นใหม่นี้จะมีอัตราเร็วและความถี่เท่ากับคลื่นเดิม หน้าคลื่นใหม่เกิดจากการลากเส้นสัมผัสที่เชื่อมหน้าคลื่นวงกลมด้านหน้าของแหล่งกำเนิดจุดที่เกิดขึ้น ณ เวลาเดียวกัน ดังแสดงในรูป 9.12



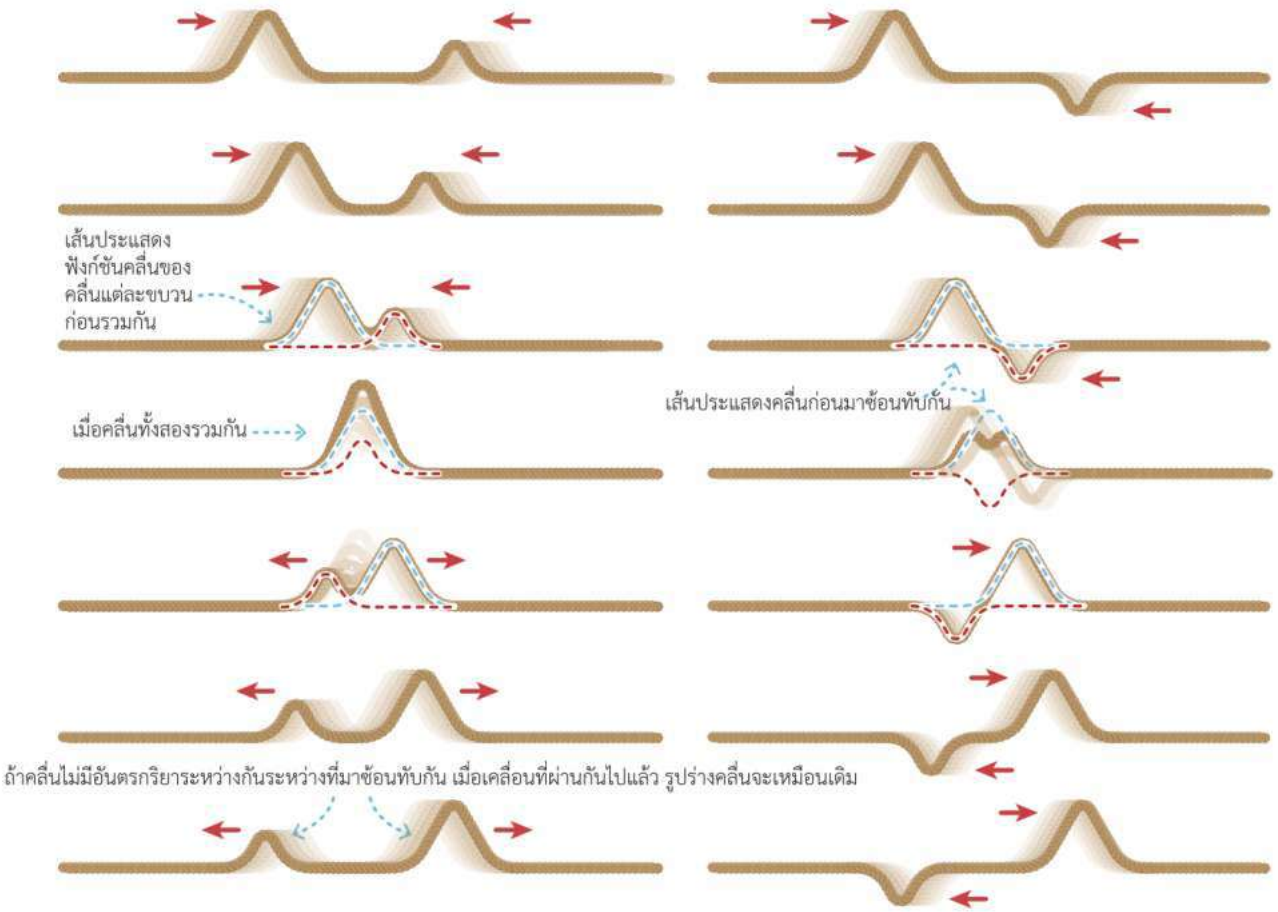
ก. คลื่นวงกลม ข. คลื่นระนาบ

รูป 9.12 หน้าคลื่นที่เกิดจากคลื่นวงกลมเล็ก ๆ ทำให้เกิดหน้าคลื่นใหม่ซึ่งขนานกับหน้าคลื่นเดิม

9.3.2 หลักการซ้อนทับ

เมื่อคลื่น 2 คลื่น เคลื่อนที่มาซ้อนทับกันในตัวกลางหนึ่ง ๆ คลื่นรวมจะมีค่าตามหลักการซ้อนทับ (principle of superposition) กล่าวคือ คลื่นรวมจะมีการกระจัดของตัวกลางที่แต่ละตำแหน่ง ณ เวลาหนึ่ง ๆ เท่ากับผลบวกของการกระจัดของตัวกลางที่เกิดจากแต่ละคลื่นที่ตำแหน่งและเวลานั้น ๆ

ถ้าคลื่น 2 คลื่น เคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกัน เมื่อซ้อนทับแล้ว คลื่นแต่ละขบวนก็จะเคลื่อนที่ผ่านกันไปโดยยังคงรูปร่างและทิศทางการเคลื่อนที่ของแต่ละคลื่นไว้



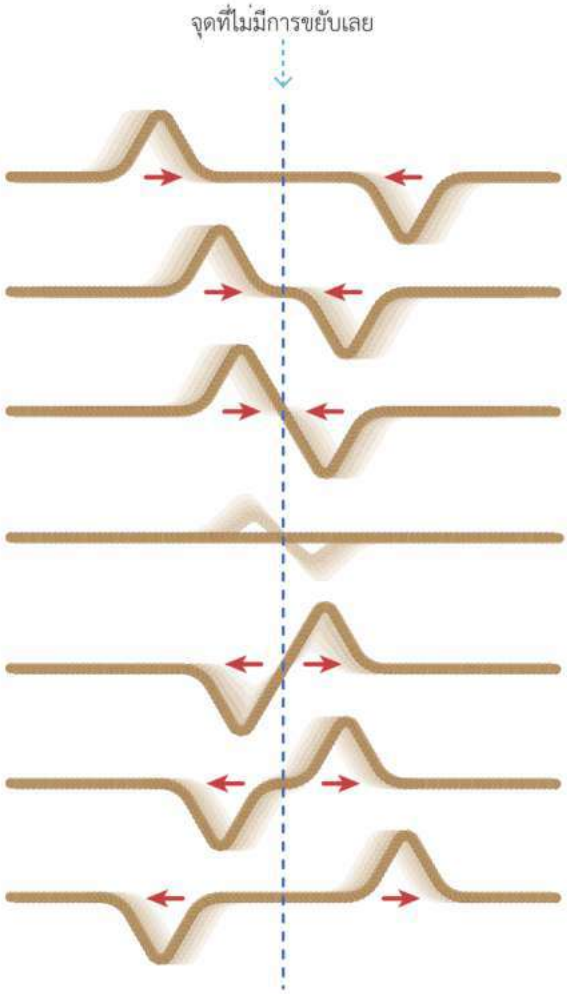
ก. รวมแบบเสริมกัน ข. รวมแบบหักล้างกัน

รูป 9.13 แสดงคลื่น 2 คลื่นที่มีแอมพลิจูดไม่เท่ากันเคลื่อนที่ในทิศทางตรงข้ามกัน

ในกรณีของคลื่นดล ถ้าคลื่น 2 คลื่นมีการกระจัดของตัวกลาง ณ ตำแหน่งที่รวมกันอยู่ในทิศทางเดียวกัน เราเรียกผลของการซ้อนทับกันนั้นว่า **การแทรกสอดแบบเสริม** (constructive interference) แต่ถ้า ณ ตำแหน่งที่มารวมกัน มีการกระจัดของตัวกลาง ณ ตำแหน่งที่มารวมกันอยู่ในทิศทางที่ตรงข้ามกัน เราเรียกการแทรกสอดนั้นว่า **การแทรกสอดแบบหักล้าง** (destructive interference)

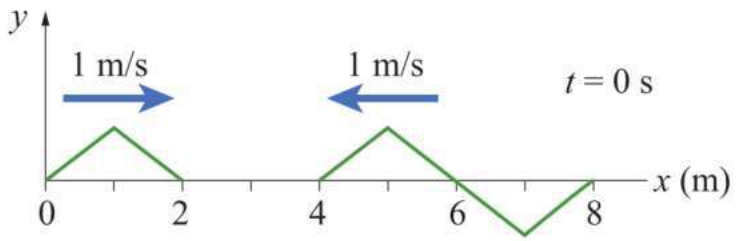
ในรูปที่ 9.13 แสดงการรวมกันของคลื่นดล 2 คลื่นที่มีแอมพลิจูดต่างกันและเคลื่อนที่สวนทางกัน ใน 2 ลักษณะ คือ กรณีในรูป 9.13 ก. เป็นการแทรกสอดแบบเสริม ขณะที่ 9.13 ข. เป็นการแทรกสอดแบบหักล้าง

ถ้าคลื่นที่มาแทรกสอดกันเป็นแบบหักล้างกัน โดยแอมพลิจูดของคลื่นทั้งสองมีค่าเท่ากัน เราจะพบว่า มีตำแหน่งหนึ่งในตัวกลางที่จะไม่มีการเคลื่อนที่หรือขยับเลยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 9.14



รูป 9.14 การแทรกสอดของคลื่นแบบหักล้างกันเมื่อคลื่นทั้งสองมีแอมพลิจูดขนาดเท่ากันพอดี เมื่อมารวมกันจะเกิดจุดที่ไม่มีการเคลื่อนที่เลย

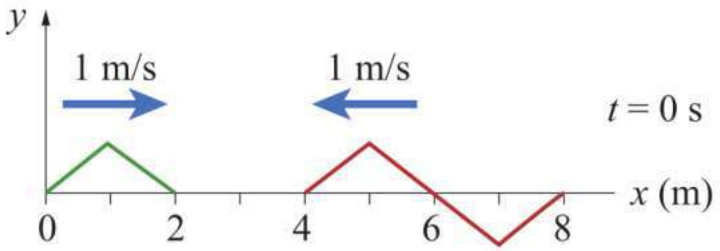
ตัวอย่าง 9.5 มีคลื่นดล 2 คลื่น เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางเดียวกันแต่ในทิศทางตรงข้ามกัน โดยอัตราเร็วของคลื่นมีค่าเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาทีและมีรูปร่างดังแสดงในรูปด้านล่าง จงใช้หลักการซ้อนทับ วาดรูปร่างของคลื่นรวมเมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที 3 วินาทีและ 4 วินาที



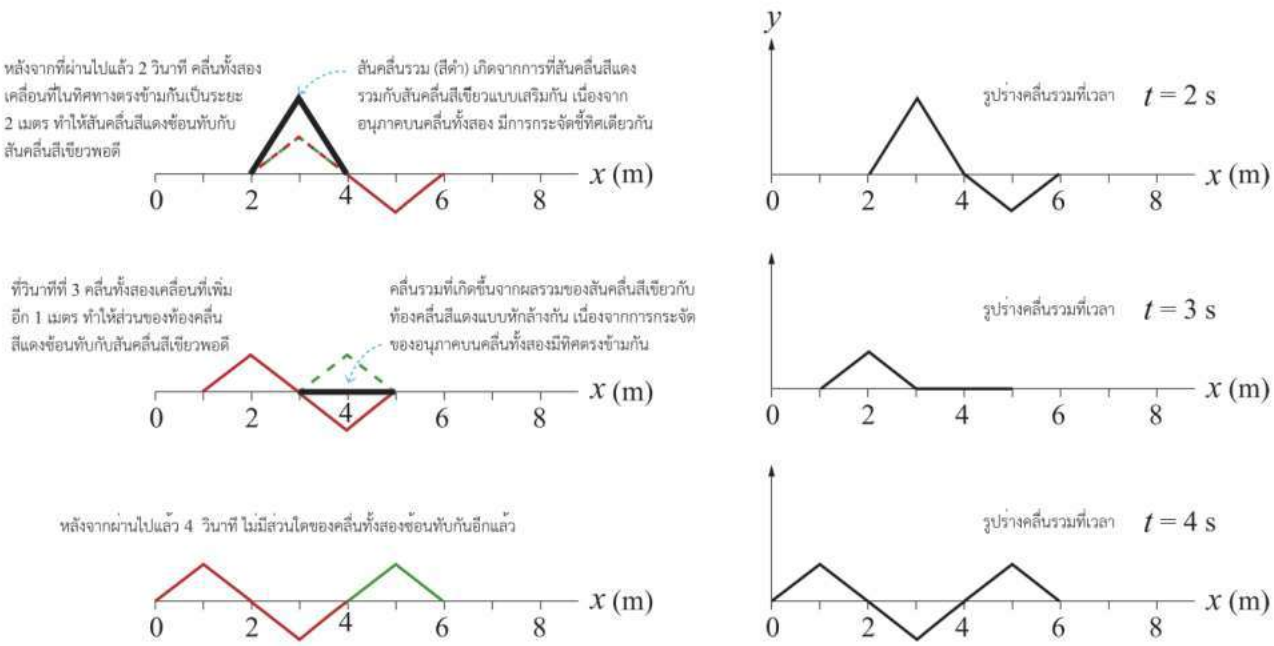
แนวคิด เขียนภาพคลื่นลูกซ้ายเคลื่อนที่ไปทางขวา และคลื่นลูกขวาเคลื่อนที่ไปทางซ้าย เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที 3 วินาทีและ 4 วินาที แล้วหาผลรวมการกระจัดคลื่นที่ซ้อนทับกัน

วิธีทำ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไป รูปร่างของคลื่นจะไม่เปลี่ยนแปลง และเมื่อคลื่นเคลื่อนมาถึงที่ตำแหน่งเดียวกัน ตามหลักการซ้อนทับ การกระจัดของตัวกลางของคลื่นรวมจะเท่ากับผลบวกของการกระจัดของตัวกลาง ณ ตำแหน่งและเวลานั้น ๆ ของคลื่นแต่ละขบวน ซึ่งในกรณีนี้คือผลบวกของค่าความสูง หรือค่า y ของแต่ละคลื่นที่ตำแหน่ง x เดียวกัน ณ เวลาหนึ่ง ๆ นั่นเอง

รูปด้านล่างแสดงการรวมกันดังกล่าว และเพื่อให้เห็นภาพชัดขึ้น จึงให้คลื่นที่เคลื่อนไปทางขวามีสีเดิม แต่คลื่นที่เคลื่อนไปทางซ้ายมีสีแดง



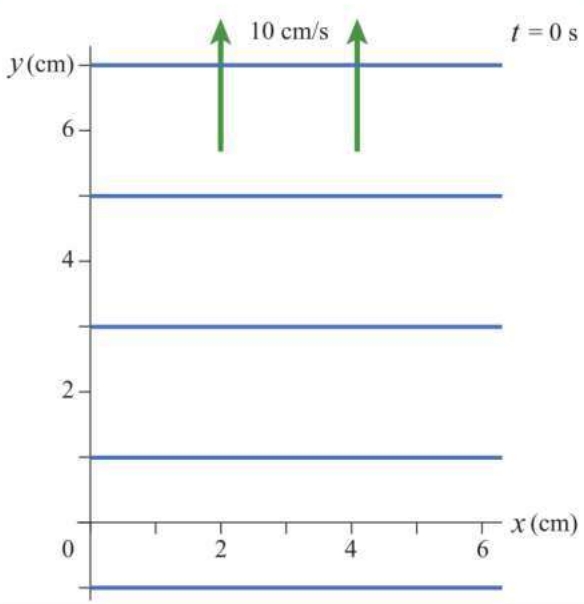
รูปด้านล่างซ้ายแสดงตำแหน่งของคลื่นทั้งสอง โดยเส้นสีดำแสดงผลรวมจากการซ้อนทับกัน รูปขวาเป็นรูปร่างหรือการกระจัดของตัวกลางของคลื่นรวม



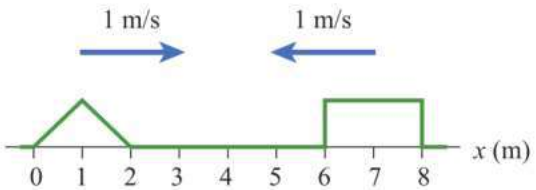
ตอบ รูปร่างคลื่นรวม เมื่อเวลาผ่านไป 2 วินาที 3 วินาที และ 4 วินาที มีลักษณะดังรูปด้านบนขวา

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 9.3

1. พิจารณาหน้าคลื่นระนาบ ณ เวลาเริ่มต้น t เท่ากับ 0 วินาที ที่กำลังเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็ว 10 เซนติเมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปด้านขวา ความยาวคลื่นของคลื่นนี้มีค่าเท่าใด และแนวของสันคลื่นกับแนวของท้องคลื่นอยู่ที่ค่า y เท่าใดบ้าง

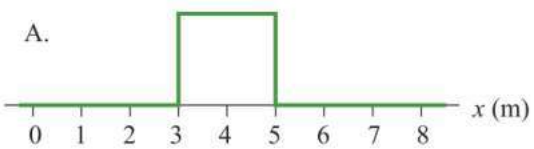


2. พิจารณาคลื่นดล 2 คลื่นที่เคลื่อนที่ในทิศทางตรงกันข้าม โดยทั้งคู่มีอัตราเร็วเท่ากันเท่ากับ 1.0 เมตรต่อวินาที โดยมีการกระจัดของตัวกลางที่ตำแหน่งต่าง ๆ ที่เวลาเริ่มต้นเป็นดังรูป รูปในตัวเลือกข้อใดแสดงการกระจัดของตัวกลางได้ถูกต้องหลังจากเวลาผ่านไปแล้ว 3.0 วินาที จากตอนเริ่มต้น

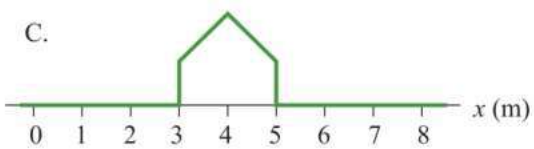


แสดงตำแหน่งของคลื่นดล 2 คลื่น ณ เวลา $t = 0$ s

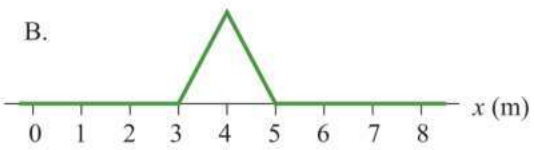
A.



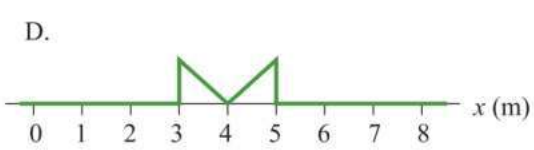
C.



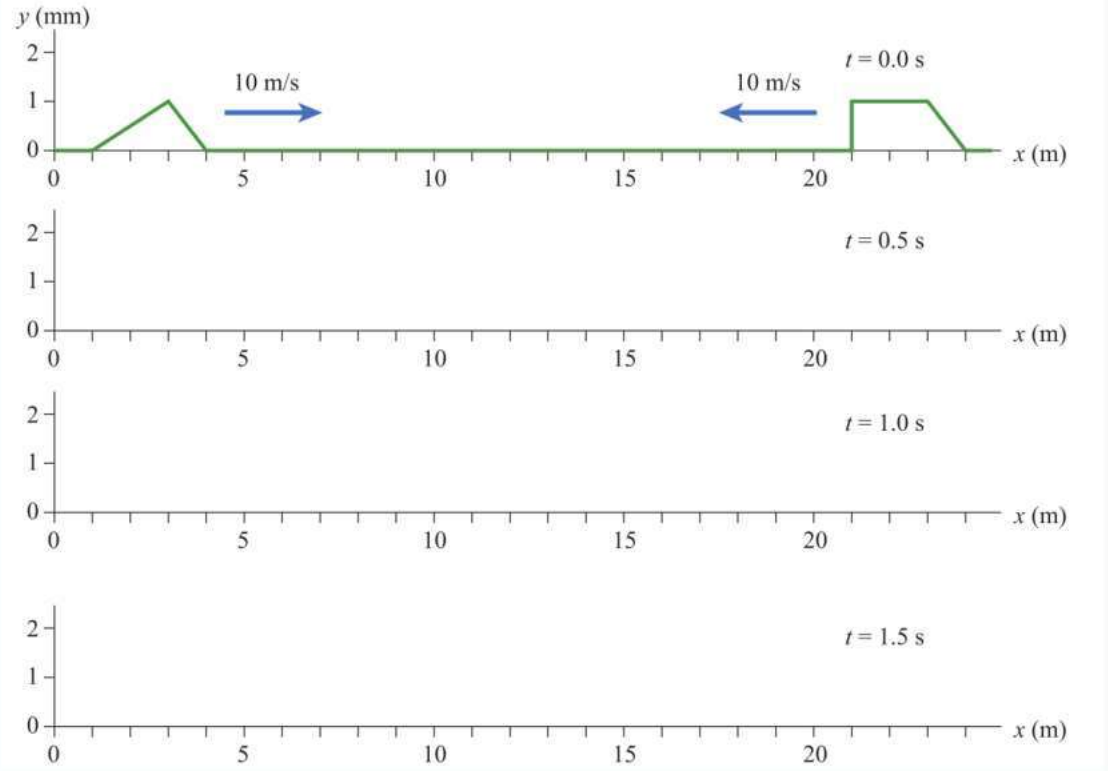
B.



D.



3. คลื่นดล 2 คลื่น มีรูปร่างต่างกัน เคลื่อนที่เข้าหากันด้วยอัตราเร็ว 10 เมตรต่อวินาที ดังรูป จงวาดรูปร่างคลื่นรวมที่เวลาถัดมา ตามที่ระบุในรูป



9.4 พฤติกรรมของคลื่น

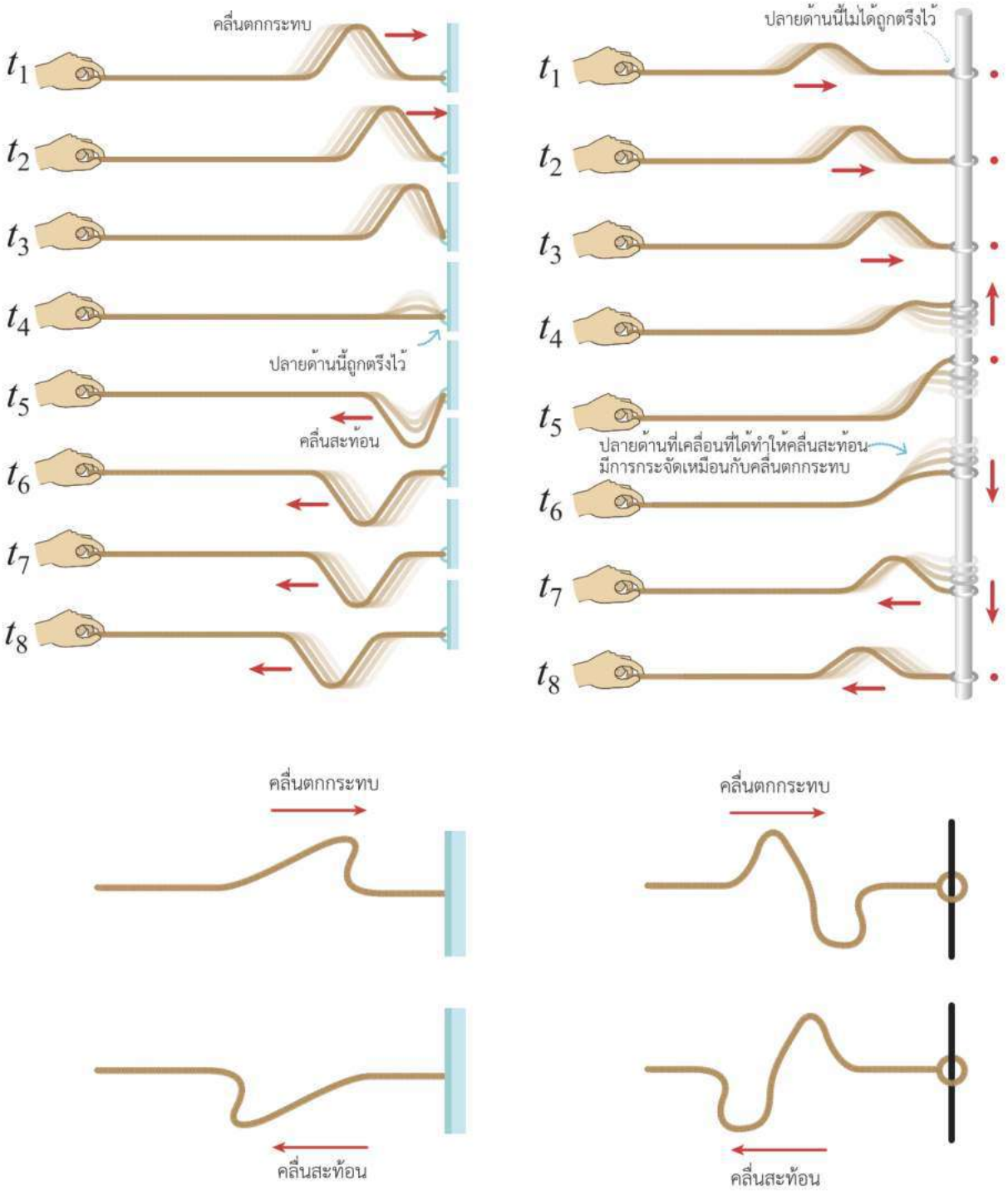
พฤติกรรมของคลื่นทำให้เกิดปรากฏการณ์ธรรมชาติมากมาย การศึกษาพฤติกรรมของคลื่นทำให้เข้าใจและสามารถอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้ อีกทั้งนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้ พฤติกรรมของคลื่นได้แก่

9.4.1 การสะท้อนของคลื่น

คลื่นเคลื่อนที่มาถึงขอบเขตของตัวกลาง เมื่อกระทบรอยต่อของตัวกลาง พบว่าเกิดคลื่นออกมาจากรอยต่อกลับมายังตัวกลางเดิม พฤติกรรมนี้คือการสะท้อนของคลื่น คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหารอยต่อของตัวกลางเรียกว่า **คลื่นตกกระทบ** (incident waves) คลื่นที่เคลื่อนที่ออกมาจากรอยต่อกลับมายังตัวกลางเดิม เรียกว่า **คลื่นสะท้อน** (reflected waves) ศึกษารูปร่างการสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือก ดังแสดงในรูป 9.15

พิจารณา รูป 9.15 ก. ทางด้านซ้ายแสดงการสะท้อนที่เกิดขึ้นในกรณีที่ปลายเชือกยึดตรึงแน่นกับกำแพง เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงจุดที่ตรึงอยู่กับกำแพง กำแพงจะดึงเชือกลง (เพราะเชือกดึงกำแพงขึ้น กำแพงจึงออกแรงดึงเชือกกลับ ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 3 ของนิวตัน) ทำให้เกิดคลื่นสะท้อนกลับที่มีรูปร่างกลับด้าน กล่าวคือ มีการกระจัดของตัวกลางเทียบกับแนวสมดุล ตรงข้ามกับคลื่นตกกระทบหรือกล่าวได้ว่า คลื่นสะท้อนมีเฟสตรงข้ามกับคลื่นตกกระทบ

แต่ถ้าปลายเชือกสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงได้อิสระ ดังแสดงในรูปด้านขวาของรูป 9.15 ข. คลื่นที่สะท้อนออกมาจะมีการกระจัดตัวกลางที่มีทิศทางเดียวกับของคลื่นตกกระทบ หรือกล่าวได้ว่า คลื่นสะท้อนมีเฟสตรงกันกับคลื่นตกกระทบ



รูป 9.15 แสดงการสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือกที่ปลายเชือก 2 ลักษณะ ก. ปลายเชือกถูกตรึงให้อยู่กับที่ ข. ปลายเชือกมีอิสระในการเคลื่อนที่ขึ้นลง รูปด้านล่างแสดงกรณี (ถ้าเกิดขึ้นได้) ที่คลื่นตกกระทบมีรูปร่างที่ไม่สมมาตร

สำหรับการสะท้อนของคลื่นน้ำมีลักษณะเป็นอย่างไร จะได้ศึกษาจากกิจกรรม 9.2 การสะท้อนของคลื่นผิวน้ำ

กิจกรรม 9.2 การสะท้อนของคลื่นผิวน้ำ

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายการสะท้อนของคลื่นผิวน้ำ

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดถาดคลื่น 1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำพร้อมสายไฟ 1 ชุด
3. กระดาษขาว 1 แผ่น

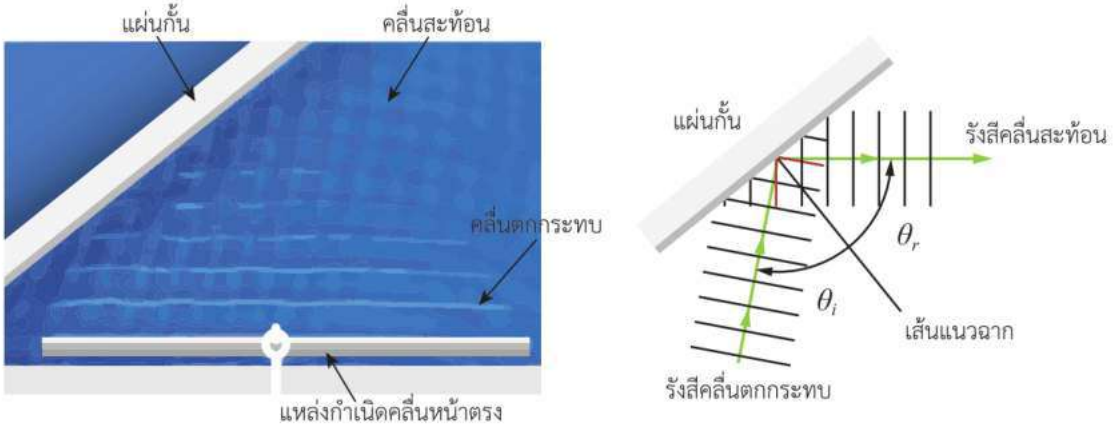
วิธีทำกิจกรรม

1. ทำให้เกิดคลื่นหน้าตรงบนถาดคลื่น
2. ลากเส้นบนกระดาษขาวที่เป็นฉากใต้ถาดคลื่นโดยให้ขนานกับแนวหน้าคลื่นกำหนดให้เป็นแนวอ้างอิง
3. ลากเส้นบนฉากให้ทำมุม 30 องศากับแนวอ้างอิง
4. วางแผ่นกั้นบนถาดคลื่นให้ทำมุม 30 องศากับแนวหน้าคลื่น (เงาของแผ่นกั้นอยู่ในแนวเส้นตรงบนฉากที่ทำมุมกับแนวอ้างอิง)
5 ลากแนวหน้าคลื่นสะท้อนบนฉากบันทึกมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแผ่นกั้น
6. ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนมุมเป็น 45 และ 60 องศา ตามลำดับ

คำถามท้ายกิจกรรม

□ ในแต่ละกรณี มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบกระทำต่อแผ่นกั้น และมุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับแผ่นกั้นมีความสัมพันธ์กันหรือไม่อย่างไร

แหล่งกำเนิดคลื่นเส้นตรงกระทบผิวสะท้อนหน้าตรงที่ขนานและทำมุมต่าง ๆ กับหน้าคลื่นตกกระทบ



รูป 9.16 ก. แสดงภาพที่มองจากมุมบนของคลื่นน้ำตกกระทบที่เคลื่อนที่ขึ้นด้านบนไปตกกระทบกับแผ่นกั้น ซึ่งวางตัวทำมุม 45 องศากับแนวนอน และคลื่นสะท้อนออกมาจะเคลื่อนที่ไปทางขวา ข. แผนภาพรังสีและหน้าคลื่นของคลื่นทั้งสอง

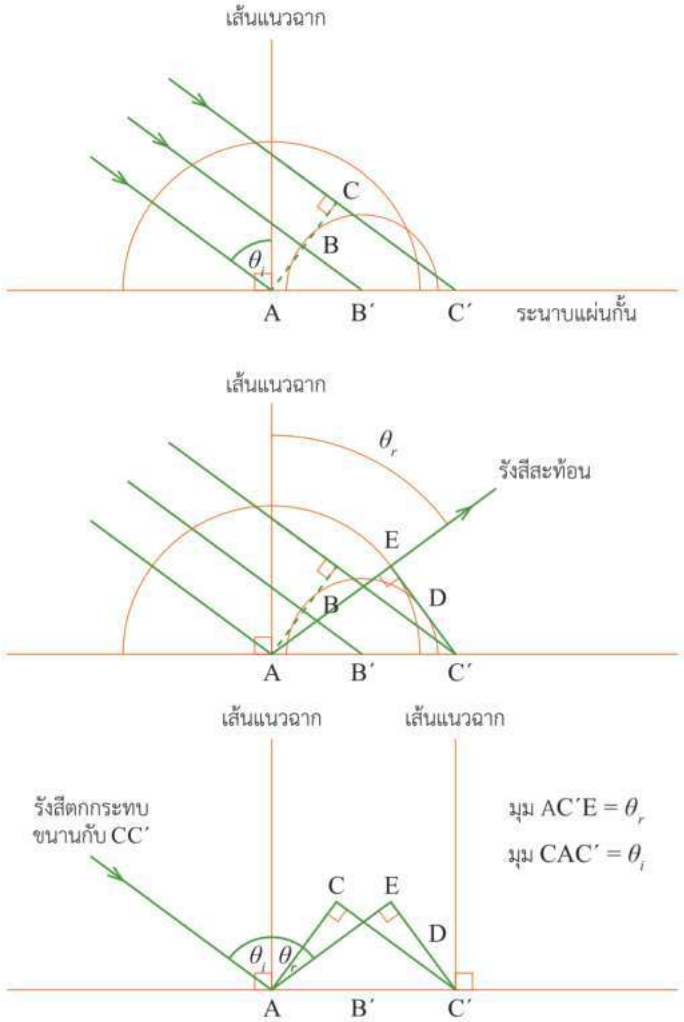
รูป 9.16 แสดงการสะท้อนของคลื่นผิวน้ำ รูป 9.16 ก. แสดงภาพจากมุมบนของคลื่นต่อเนื่องในน้ำ ซึ่งเป็นคลื่นระนาบที่เคลื่อนที่ไปตกกระทบและสะท้อนที่แผ่นกั้น โดยคลื่นตกกระทบเคลื่อนที่ไปทางด้านบนของรูป และคลื่นสะท้อนเคลื่อนที่ออกไปทางขวาของรูป รูป 9.16 ข. เป็นภาพแสดงทิศทางของการแผ่ไปของคลื่นซึ่งแทนด้วยเส้นลูกศรที่ชี้ในทิศทางนั้น เรียกเส้นนี้ว่า เส้นรังสี (ray) โดยเส้นนี้จะตั้งฉากกับหน้าคลื่นเสมอ โดยกำหนดว่า

เส้นแนวฉาก คือเส้นตรงที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของแผ่นกั้น ณ จุดที่รังสีตกกระทบ

มุมตกกระทบ θ_i คือ มุมที่เส้นรังสีตกกระทบทำกับแนวฉาก

มุมสะท้อน θ_r คือ มุมที่เส้นรังสีสะท้อนทำกับเส้นแนวฉาก

และเส้นรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน รอยต่อขอบเขตของตัวกลาง และเส้นแนวฉากอยู่ในระนาบเดียวกัน



รูป 9.17 แสดงเรขาคณิตสำหรับการพิสูจน์ว่า มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน $\theta_i = \theta_r$

เราสามารถใช้หลักการของฮอยเกนส์หาความสัมพันธ์ระหว่างมุมทั้งสองได้ดังรูป 9.17 แสดงการพิสูจน์ความสัมพันธ์ดังกล่าว

1. รูปด้านบนสุด แสดงเส้นรังสีตกกระทบ 3 เส้น ซึ่งตกกระทบด้วยมุม θ_i เส้นประแทนหน้าคลื่น 1 หน้า จุด A B และ C อยู่บนหน้าคลื่น สังเกตว่าจุด A เคลื่อนที่ถึงแผ่นกั้นแล้ว แต่จุด B กับจุด C ยังเคลื่อนที่มาไม่ถึง
2. เมื่อหน้าคลื่น ABC กระทบแผ่นกั้นที่จุด A ก่อน จากหลักการของฮอยเกนส์ คลื่นที่จุด A นี้จะทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุดที่มีหน้าคลื่นเป็นวงกลมของคลื่นสะท้อน และทำนองเดียวกันเมื่อ จุด B กับ จุด C บนหน้าคลื่น เคลื่อนที่มากระทบแผ่นกั้นที่จุด B′ กับ C′ 2 จุดนี้ก็จะทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุดของคลื่นสะท้อนเช่นเดียวกัน
3. เมื่อจุด C เคลื่อนที่มาถึง C′ หน้าคลื่นวงกลมที่เกิดจากจุด A จะมีขนาดใหญ่ที่สุด และหน้าคลื่นที่เกิดจากจุด B′ จะมีขนาดใหญ่รองลงมา ส่วนหน้าคลื่นที่เกิดจากจุด C′ ยังเป็นเพียงจุด (รัศมีขนาดเป็นศูนย์) อยู่

4. เมื่อลากเส้นตรงที่สัมผัสหน้าคลื่นวงกลมที่แผ่ออกไปจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด A B′ และ C′ ณ ขณะที่จุด C ตกกระทบแผ่นกีดขวางที่จุด C′ เราจะได้หน้าคลื่นสะท้อน (เส้นตรงสีแดงที่เชื่อมจุด C′D และ E ในรูปตรงกลาง)
5. ระยะ CC′ ยาวเท่ากับ AE เนื่องจาก เป็นระยะที่คลื่นสะท้อนและคลื่นตกกระทบเคลื่อนที่ได้ในช่วงเวลาเดียวกันและเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากัน
6. เส้นตรง AE เป็นแนวเส้นรังสีสะท้อน มุม AEC′ เป็นมุมฉาก
7. สามเหลี่ยม ACC′ กับ สามเหลี่ยม AEC' มีสองด้านเท่ากัน คือ ด้าน AC กับ ด้าน AE เท่ากับ CC′ และมีมุมเท่ากัน 1 มุม คือมุมฉาก ACC′ กับ AEC ดังนั้น สามเหลี่ยมทั้งสองนี้จึงเป็นสามเหลี่ยมที่เท่ากันทุกประการ เราจึงสรุปได้ว่า มุม AC′E เท่ากับ มุม CAC′ หรือมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนนั่นเอง

$$\theta_i = \theta_r \tag{9.3}$$

สรุปได้ว่า การสะท้อนของคลื่นเกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปกระทบขอบเขตของตัวกลาง ทำให้คลื่นส่วนหนึ่งกลับมาในตัวกลางเดิมและอธิบายด้วยกฎการสะท้อน คือ

เส้นรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน รอยต่อขอบเขตของตัวกลาง และเส้นแนวฉากอยู่ในระนาบเดียวกัน และมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน

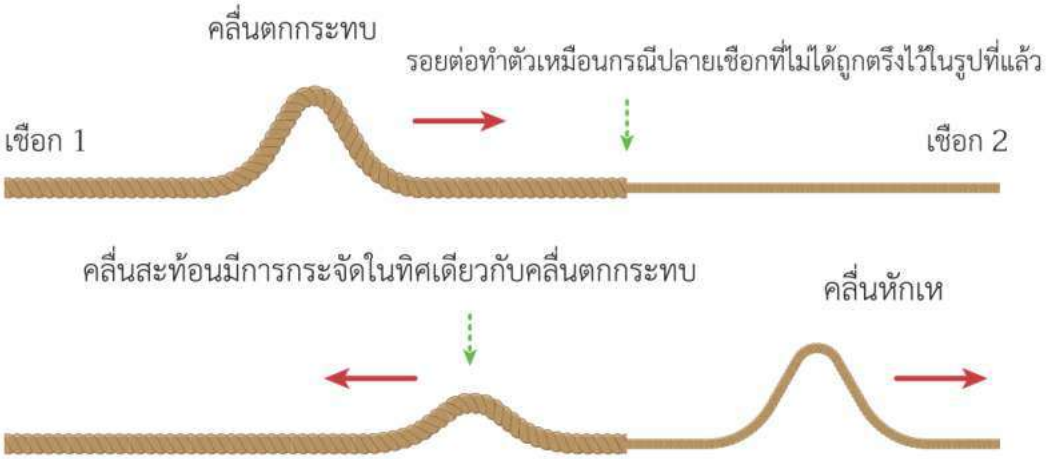
ถ้าคลื่นตกกระทบส่วนหนึ่งสามารถผ่านขอบเขตของตัวกลางเข้าไปสู่อีกตัวกลางหนึ่งได้ คลื่นนั้นจะแสดงพฤติกรรมอย่างไร

9.4.2 การหักเหของคลื่น

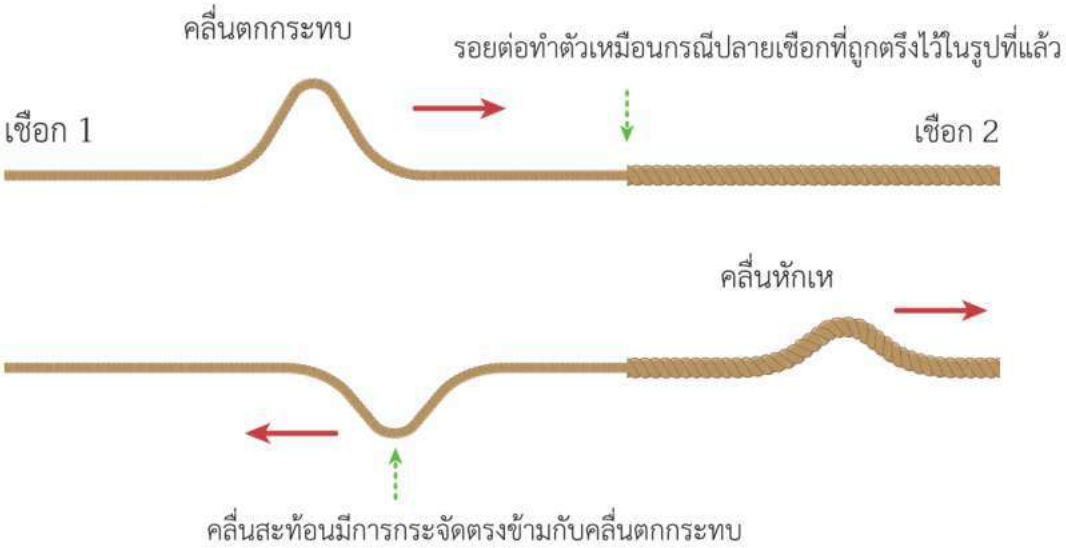
เมื่อคลื่นกระทบรอยต่อของตัวกลาง คลื่นส่วนหนึ่งสะท้อนกลับไปในตัวกลางเดิม อีกส่วนหนึ่งเคลื่อนที่ผ่านไปในอีกตัวกลางหนึ่งเรียกว่า **คลื่นหักเห** (refracted waves) หรือบางครั้งเรียกว่า **คลื่นที่ผ่านไป** (transmitted waves)

ในกรณีที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ในที่นี้จะศึกษาจากคลื่นในเส้นเชือกที่เกิดจากการนำเชือก 2 เส้นมาต่อกัน โดยมีแรงดึงเชือกเท่ากัน แต่มีค่าความหนาแน่นเชิงเส้นไม่เท่ากัน สิ่งที่เกิดขึ้นคือ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงรอยต่อ จะเกิดทั้งการสะท้อนกลับและการหักเห ซึ่งแสดงผลที่เกิดขึ้นด้วยรูป 9.18

กรณีความหนาแน่นเชิงเส้นของเชือก 1 มีค่ามากกว่าของเชือก 2



กรณีความหนาแน่นเชิงเส้นของเชือก 1 มีค่าน้อยกว่าของเชือก 2



รูป 9.18 แสดงการสะท้อนและการหักเหของคลื่นที่รอยต่อระหว่างตัวกลางที่เป็นเชือก 2 เส้นต่อกัน

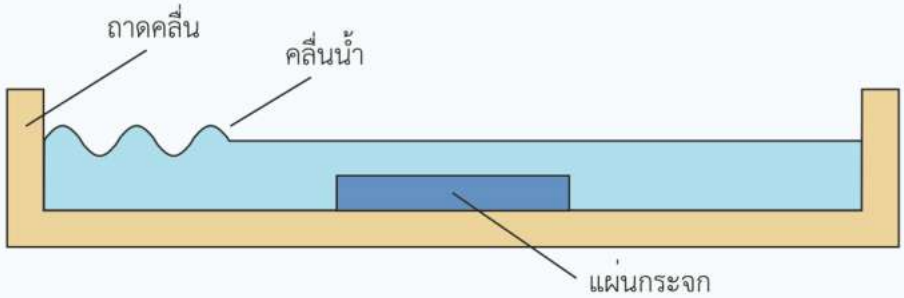
จากรูป 9.18 พบว่า

- ทั้งคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเหนั้นจะมีแอมพลิจูดเล็กกว่าคลื่นตกกระทบ โดยผลรวมของพลังงานคลื่นสะท้อนกับของคลื่นหักเห จะเท่ากับพลังงานของคลื่นตกกระทบ
- คลื่นหักเหจะมีอัตราเร็วที่ต่างไปจากคลื่นตกกระทบ เพราะเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีสมบัติต่างกัน
- ถ้าคลื่นเคลื่อนที่จากเชือกที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นต่ำไปตกกระทบเชือก ที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นสูงกว่า คลื่นสะท้อนจะมีการกระจัดของตัวกลางในทิศตรงข้ามกับคลื่นตกกระทบ (หรือ มีเฟสตรงข้ามกัน)

- ถ้าคลื่นเคลื่อนที่จากเชือกที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นสูงไปตกกระทบเชือกที่มีความหนาแน่นเชิงเส้นต่ำกว่า คลื่นสะท้อนจะมีการกระจัดของตัวกลางในทิศทางเดียวกับคลื่นตกกระทบ (หรือ มีเฟสตรงกัน)

ชวนคิด

คลื่นผิวน้ำที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณน้ำลึกไปยังน้ำตื้น จะเกิดการสะท้อนและการหักเหหรือไม่ เพราะเหตุใด



คลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีความลึกแตกต่างกันผลเป็นอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 9.3 การหักเหของคลื่นผิวน้ำ

กิจกรรม 9.3 การหักเหของคลื่นผิวน้ำ

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายการหักเหของคลื่นผิวน้ำ

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดถาดคลื่น 1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำพร้อมสายไฟ 1 ชุด
3. กระดาษขาว 1 แผ่น

วิธีทำกิจกรรม

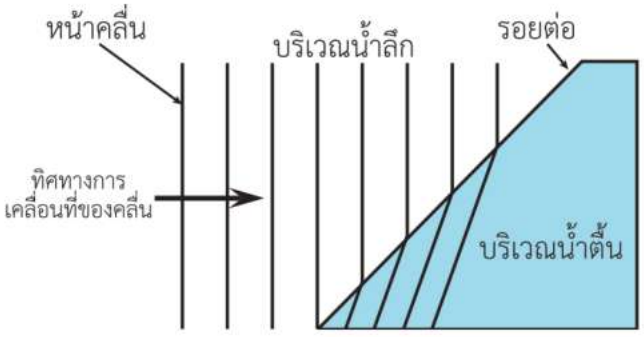
1. ใส่น้ำในถาดคลื่น วางแผ่นกระจกใสรูปสี่เหลี่ยมลงในถาดคลื่น ให้ผิวบนของกระจกใสอยู่ใต้ผิวน้ำประมาณ 1 - 2 มิลลิเมตร
2. จัดแผ่นกระจกใสให้ขอบกระจกขนานกับแนวแผ่นกำเนิดคลื่นหน้าตรงบริเวณเหนือแผ่นกระจกใสจะเป็นบริเวณน้ำตื้น

3. ทำให้เกิดคลื่นหน้าตรงเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกสู่บริเวณน้ำตื้น (บริเวณเหนือแผ่นกระจกใส) สังเกตทิศทางการเคลื่อนที่และความยาวคลื่นทั้งในบริเวณน้ำลึกและน้ำตื้น
4. ทดลองซ้ำ โดยหมุนแผ่นกระจกใสให้ขอบของกระจกทำมุมต่าง ๆ กับหน้าคลื่นสังเกตทิศทางการเคลื่อนที่และความยาวคลื่นทั้งในบริเวณน้ำลึกและน้ำตื้น

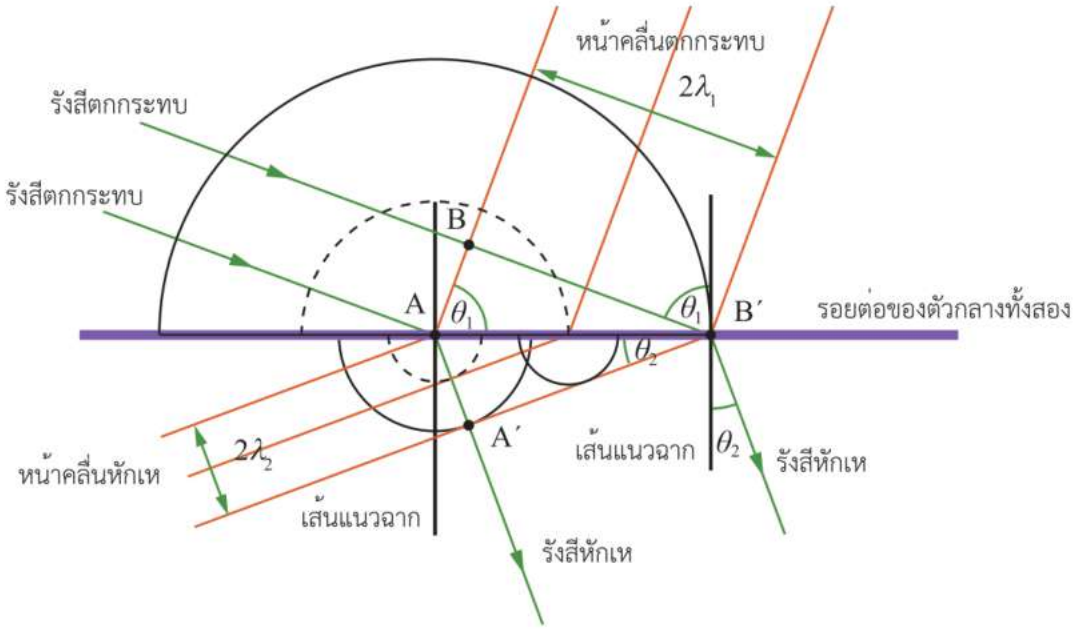
คำถามท้ายกิจกรรม

- □ เมื่อคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างเขตน้ำลึกและเขตน้ำตื้น ถ้าหน้าคลื่นตกกระทบขนานกับรอยต่อ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- □ เมื่อคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่ผ่านบริเวณรอยต่อระหว่างเขตน้ำลึกและเขตน้ำตื้น ถ้าหน้าคลื่นตกกระทบทำมุมกับรอยต่อ ทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นและความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลงอย่างไร
- □ จากการสังเกตคลื่นผิวน้ำในถาดคลื่น เมื่อคลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่มาถึงรอยต่อระหว่างเขตน้ำลึกกับเขตน้ำตื้น คลื่นมีการสะท้อนหรือไม่ อย่างไร

สำหรับการหักเหของคลื่นดังรูป 9.19 เกิดเมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง กล่าวคือ คลื่นตกกระทบกับคลื่นหักเหจะมีอัตราเร็วที่ต่างกันไป ซึ่งหมายความว่าในกรณีของคลื่นต่อเนื่อง ความยาวคลื่นตกกระทบกับความยาวคลื่นหักเหจะมีค่าต่างไปด้วย เนื่องจากความถี่ของคลื่นทั้งสองมีค่าเท่ากัน นอกจากนี้ ทิศทางของการแผ่ไปของคลื่นไม่จำเป็นต้องอยู่ในแนวที่ตั้งฉากกับระนาบรอยต่อระหว่างตัวกลางทั้งสอง โดยเราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบของคลื่นตกกระทบกับมุมหักเหของคลื่นหักเห ซึ่งเป็นมุมที่รังสีหักเหทำกับเส้นแนวฉาก ได้



รูป 9.19 แสดงหน้าคลื่นน้ำที่เกิดบนถาดน้ำซึ่งเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีน้ำลึกไม่เท่ากันแล้วเกิดการหักเห



รูป 9.20 แสดงแผนภาพของรังสีตกกระทบ รังสีหักเห แนวฉากของคลื่นตกกระทบและคลื่นหักเหที่รอยต่อของตัวกลาง 2 ชนิด และหน้าคลื่นวงกลมของคลื่นสะท้อนและคลื่นหักเห

ในรูป 9.20 ให้ θ_1 คือ มุมตกกระทบ และ θ_2 คือ มุมหักเห (มุมที่รังสีหักเหทำกับเส้นแนวฉาก) มุมทั้งสองนี้เท่ากับ มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบและมุมที่หน้าคลื่นหักเหทำกับเส้นรอยต่อของตัวกลางตามลำดับด้วย เราสามารถใช้หลักการของฮอยเกนส์เพื่อช่วยในการลากเส้นหน้าคลื่นตกกระทบและหน้าคลื่นหักเหที่เวลาต่าง ๆ ได้เช่นเดียวกับในกรณีของคลื่นสะท้อนในรูปเส้นประวงกลมด้วยกันและเส้นวงกลมทึบด้วยกัน เป็นวงหน้าคลื่นที่เกิด ณ เวลาเดียวกัน

เมื่อเราพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างมุม θ_1 และ θ_2 กับความยาวต่าง ๆ ในรูปเราจะได้ว่า

$$\sin\theta_1 = \frac{BB'}{AB'} \text{ และ } \sin\theta_2 = \frac{AA'}{AB'}$$

นั้นคือ

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{BB'}{AA'}$$

และเนื่องจาก $BB' = 2\lambda_1$ และ $AA' = 2\lambda_2$ โดยที่ λ_1 กับ λ_2 คือ ความยาวคลื่นของคลื่นตกกระทบ และของคลื่นหักเห ตามลำดับ ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{2\lambda_1}{2\lambda_2} = \frac{v_1/f}{v_2/f} = \frac{v_1}{v_2}$$

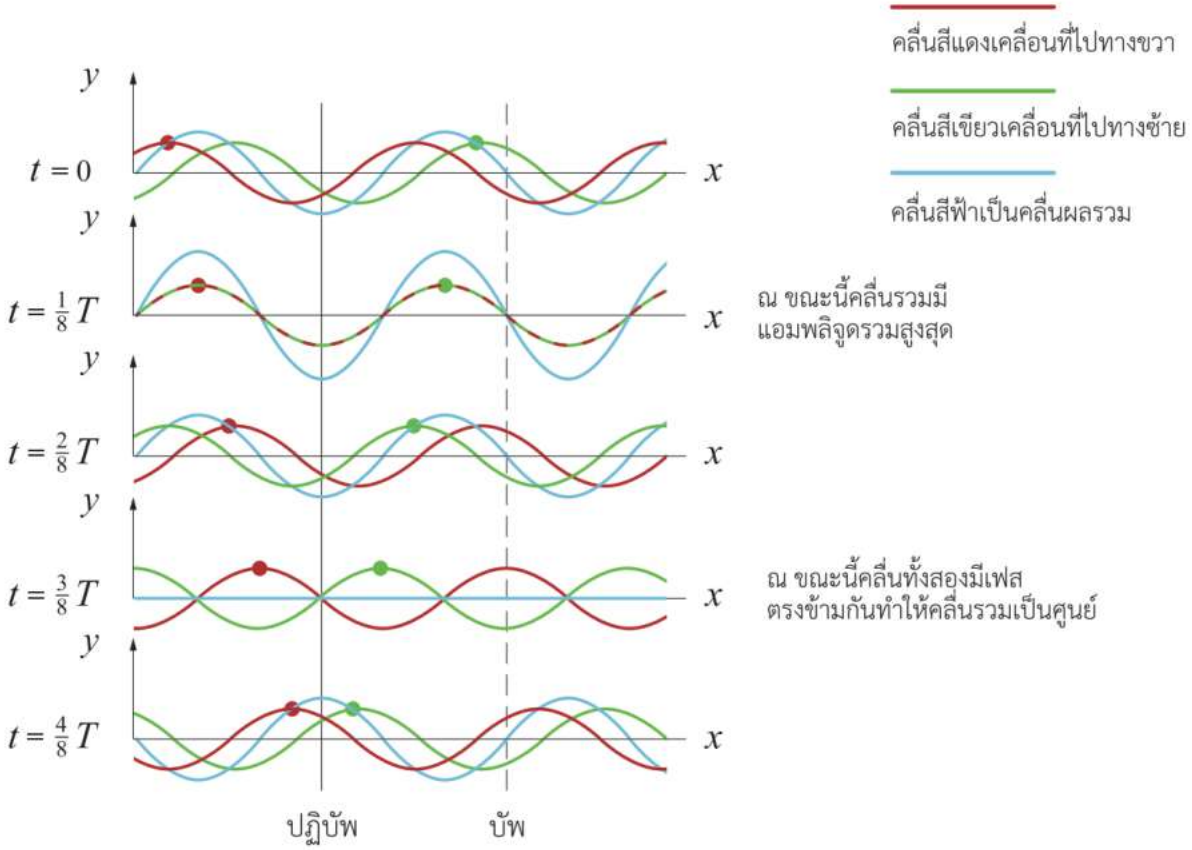
นั่นคือ มุมสะท้อนและมุมหักเหบอกอัตราส่วนของอัตราเร็วของคลื่นในตัวกลางทั้งสองได้และความสัมพันธ์นี้เรียกว่า กฎการหักเหของคลื่น

ในกรณีที่คลื่นตกกระทบเป็นคลื่นต่อเนื่อง คลื่นหักเหจะมีอัตราเร็วต่างไปจากของคลื่นตกกระทบเช่นเดียวกับในกรณีของคลื่นดล แต่ความถี่ของคลื่นหักเหกับคลื่นตกกระทบจะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นความยาวคลื่นของคลื่นหักเหจึงไม่เท่ากับของคลื่นตกกระทบ

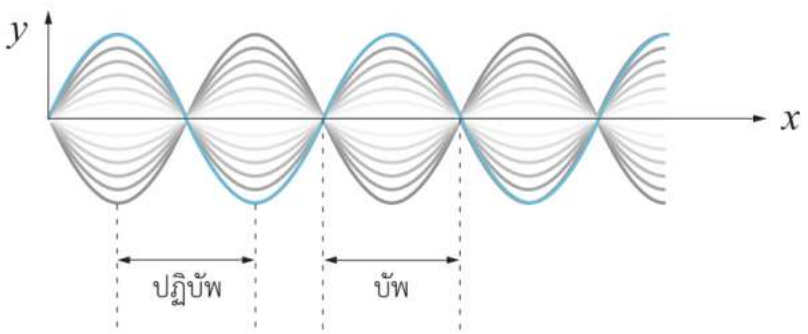
9.4.3 การแทรกสอดของคลื่น

เมื่อคลื่นที่เคลื่อนที่มาพบกัน จะเกิดการรวมกันตามหลักการซ้อนทับของคลื่นโดยเราจะพิจารณากรณีที่ คลื่นทั้งสองขบวนมีความยาวคลื่น ความถี่ และแอมพลิจูดเท่ากัน

คลื่นฮาร์มอนิกสองขบวนมีแอมพลิจูด ความยาวคลื่น และความถี่เท่ากัน แต่เคลื่อนที่สวนทางกันมาซ้อนทับกันแสดงผลการรวมคลื่นด้วยรูป 9.21



รูป 9.21 กราฟแสดงการรวมกันของคลื่นที่เคลื่อนที่สวนทางกัน



รูป 9.22 กราฟแสดงคลื่นนิ่งที่เกิดจากคลื่นฮาร์มอนิกสองขบวนที่มีความถี่และแอมพลิจูดเท่ากันเคลื่อนที่สวนทางกัน

อธิบายการรวมกันของคลื่นดังนี้ ตามรูป 9.21 แสดงคลื่นฮาร์มอนิก 2 ขบวนดังกล่าวด้วยกราฟเส้นสีแดงกับสีเขียว โดยแสดงค่ากระจัดของตัวกลาง y ที่ตำแหน่ง x ต่าง ๆ ณ เวลาที่ต่างกัน 5 เวลา กราฟของคลื่นรวมตามหลักการของการซ้อนทับแสดงด้วยเส้นกราฟสีฟ้า ตำแหน่งบนแกน x ตรงแนวเส้นทึบเส้นตรงทึบเป็นตัวอย่างของตำแหน่งที่อนุภาคตัวกลางในคลื่นรวมมีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ 2 เท่าของแอมพลิจูดของคลื่นแต่ละขบวน เราเรียกจุดนี้ว่า **จุดปฏิบัพ** (antinode) และตำแหน่งบนแกน x ตรงแนวเส้นประ เป็นตัวอย่างของตำแหน่งที่อนุภาคตัวกลางในคลื่นรวมอยู่นิ่ง เราเรียกจุดนี้ว่า **จุดบัพ** (node) การที่มีจุดบัพนี้ทำให้ดูเหมือนว่าคลื่นรวมไม่มีการเคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือทางขวาเราจึงเรียกคลื่นรวมนี้ว่า **คลื่นนิ่ง** (standing wave)

ตามรูป 9.22 แสดงคลื่นนิ่งซึ่งมีความยาวคลื่นและความถี่เท่ากับความยาวคลื่นและความถี่ของคลื่นแต่ละขบวนที่มาซ้อนทับกัน แต่จะมีแอมพลิจูดเป็น 2 เท่า และระยะระหว่างจุดบัพที่อยู่ถัดกันเท่ากับระยะระหว่างจุดปฏิบัพที่อยู่ถัดกันและเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

ชวนคิด

ในรูป 9.21 มีตำแหน่งอื่นอีกหรือไม่ที่เป็นจุดบัพกับจุดปฏิบัพ

ชวนคิด

ถ้าคลื่นฮาร์มอนิก 2 ขบวนที่เคลื่อนที่สวนทางกันมาซ้อนทับกันโดยทั้งคู่มีความถี่และความยาวคลื่นเท่ากันแต่แอมพลิจูดไม่เท่ากันจะเกิดคลื่นนิ่งได้หรือไม่

เมื่อผูกปลายเชือกด้านหนึ่งเข้ากับผนัง สะบัดปลายเชือกอีกด้านหนึ่งด้วยคาบสม่ำเสมอทำให้เกิดคลื่นฮาร์มอนิกเคลื่อนที่เข้าหาผนัง และคลื่นสะท้อนกลับมาซ้อนทับกัน เมื่อรวมกันจะปรากฏลักษณะใด

กิจกรรมลองทำดู คลื่นนิ่งในเส้นเชือก

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายคลื่นนิ่งในเส้นเชือก

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องเคาะสัญญาณเวลา 1 เครื่อง
2. เชือกสายป่านว่าวหรือด้ายเย็บผ้า ยาวประมาณ 2 เมตร 1 เส้น
3. หม้อแปลงไฟฟ้าโวลต์ต่ำพร้อมสายไฟ 1 ชุด
4. รางไม้พร้อมรอก 1 ชุด
5. นอต 6 ตัว

วิธีทำกิจกรรม

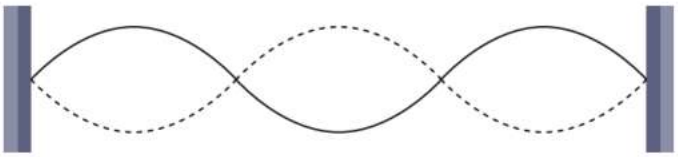
1. วางรางไม้ให้ปลายที่ติดรอกชิดขอบโต๊ะ วางเครื่องเคาะสัญญาณเวลาที่ต่อกับหม้อแปลงไฟฟ้าที่ปลายด้านตรงข้าม
2. ผูกปลายข้างหนึ่งของเส้นเชือก กับคันเคาะของเครื่องเคาะสัญญาณเวลา คล้องเชือกกับรอกให้ปลายห้อยลงแขวนนอตให้เชือกมีความตึงพอเหมาะ
3. เปิดสวิตช์ให้เครื่องเคาะสัญญาณเวลาทำงาน สังเกตลักษณะของคลื่นที่เกิดขึ้นในเชือก
4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 3 อีก 2 ครั้ง โดยเพิ่มนอตครั้งละ 1 ตัว

คำถามท้ายกิจกรรม

□ ลักษณะของคลื่นเมื่อเพิ่มแรงดึงเชือกเปลี่ยนแปลงอย่างไร

คลื่นตกกระทบในเชือกกับคลื่นสะท้อนมีความยาวคลื่น ความถี่ และ แอมพลิจูดเท่ากัน จึงรวมกันแล้วเกิดคลื่นนิ่งในเส้นเชือก เมื่อเพิ่มแรงดึงของเชือกทำให้อัตราเร็วคลื่นในเชือกเพิ่มขึ้น ในขณะที่ความถี่คลื่นคงเดิม ทำให้ความยาวคลื่นยาวกว่าเดิม คลื่นที่เกิดขึ้นมีจุดบัพถัดกันห่างกันมากกว่าเดิม

ตัวอย่าง 9.6 ลวดเส้นหนึ่งยาว 150 เซนติเมตร ถูกตรึงไว้ให้ตึง ทำให้มีคลื่นต่อเนื่องเคลื่อนที่ผ่านได้โดยมีอัตราเร็วคลื่นเท่ากับ 50 เมตรต่อวินาที ถ้าเกิดคลื่นนิ่งในลวดนี้โดยปลายทั้งสองข้างของลวดอยู่นิ่ง ดังรูป ความถี่ของคลื่นนี้มีค่าเท่าใด



แนวคิด หาความยาวคลื่นจากจุดบัพที่ถัดกัน หรือปฏิบัพที่ถัดกันอยู่ห่างกัน $\frac{\lambda}{2}$ และหาความถี่จากสมการ $v = f\lambda$

วิธีทำ จากรูปแบบของคลื่นนิ่งที่ให้มา เราสรุปได้ว่าความยาวของเส้นลวดนี้มีค่าเท่ากับ

$$3\left(\frac{\lambda}{2}\right) = 1.50\,\text{m}$$

ดังนั้น $\lambda = 1.00\,\text{m}$

จาก $v = f\lambda$

เราจึงหาค่าความถี่ได้จาก $f = \frac{v}{\lambda} = \frac{50\,\text{m/s}}{1.00\,\text{m}} = 50\,\text{s}^{-1} = 50\,\text{Hz}$

ตอบ ความถี่ของคลื่นนี้มีค่า 50 เฮิรตซ์

ถ้าแหล่งกำเนิดคลื่นสองแหล่งอยู่ในตัวกลางเดียวกัน แผ่คลื่นออกมาพบกัน จะเกิดปรากฏการณ์ใด

กิจกรรม 9.4 การแทรกสอดของคลื่นผิวน้ำ

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายการแทรกสอดของคลื่นผิวน้ำ

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดถาดคลื่น 1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำพร้อมสายไฟ 1 ชุด
3. กระดาษขาว 1 แผ่น

วิธีทำกิจกรรม

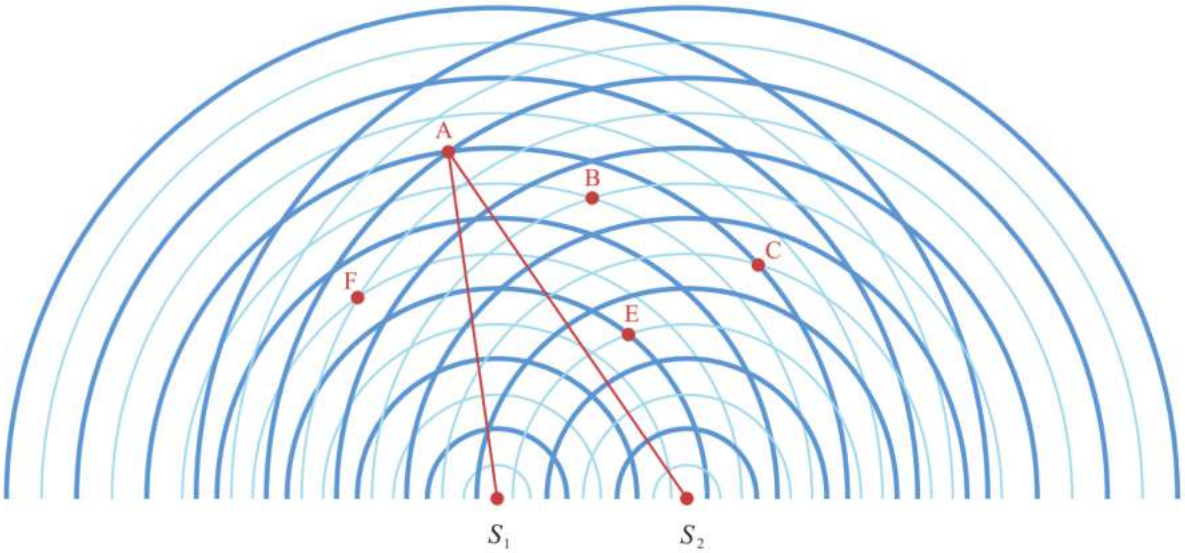
1. ใส่น้ำในถาดคลื่น จัดปุ่มกำเนิดคลื่นอันกลางและปุ่มด้านข้างอันใดอันหนึ่งให้แตะผิวน้ำ
2. ทำให้เกิดคลื่นต่อเนื่องวงกลมสองขบวนที่เหมือนกันทุกประการแผ่ออกไป สังเกตภาพที่เกิดขึ้นบนแผ่นกระดาษที่เป็นฉาก

คำถามท้ายกิจกรรม

□ จากภาพคลื่นต่อเนื่องวงกลมที่สร้างโดยปุ่มกำเนิดคลื่นทั้งสองปรากฏเป็นแถบมืด แถบมืดนี้เกิดขึ้นได้อย่างไร

แหล่งกำเนิดสองแหล่งอยู่ในตัวกลางเดียวกัน ให้คลื่นต่อเนื่องที่มีแอมพลิจูด ความถี่ และความยาวคลื่นเท่ากัน มีเฟสเริ่มต้นตรงกันหรือต่างกันคงที่ จัดเป็น**แหล่งกำเนิดอาพันธ์** (coherent sources) เมื่อแหล่งกำเนิดคลื่นนี้ แผ่คลื่นออกมาดังแสดงในรูป 9.23 คลื่นที่เคลื่อนที่ออกมาเกิดการแทรกสอดกัน โดยบางจุดจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันสนิทเป็นจุดบัพ ค่าการกระจัดลัพธ์ของตัวกลางที่จุดนี้จะเป็นศูนย์ และเกิดจุดที่มีการแทรกสอดแบบเสริมกันเป็นจุดปฏิบัพ ค่าการกระจัดลัพธ์ของตัวกลางที่จุดนี้จะมีขนาดเป็นสองเท่าของแอมพลิจูดของคลื่นที่ออกมาจากแหล่งกำเนิด ส่วนตำแหน่งอื่น ๆ ที่เหลือก็จะเป็นการแทรกสอดที่ไม่ได้หักล้างกันสนิทหรือเสริมกันมากที่สุด

รูป 9.23 การแทรกสอดที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์



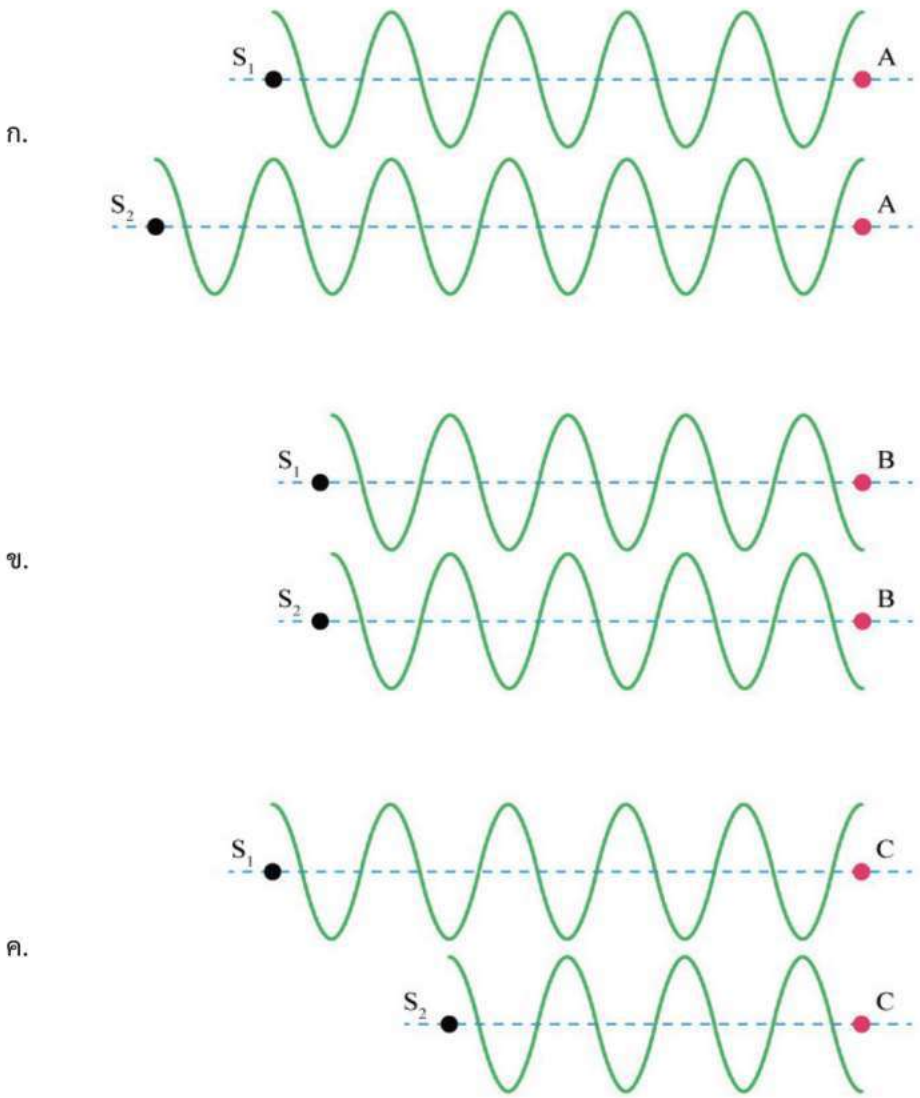
รูป 9.24 แสดงสันคลื่นซึ่งแทนด้วยเส้นโค้งหนา จากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด 2 แหล่งคือ S_1 กับ S_2 ที่เหมือนกันทุกประการ เส้นโค้งที่บางกว่า เป็นเส้นที่แทนแนวของท้องคลื่น

รูป 9.24 แสดงหน้าคลื่นของคลื่นต่อเนื่อง 2 ขบวน ณ เวลาขณะหนึ่ง ที่เกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแบบจุด S_1 กับ S_2 ซึ่งเหมือนกันทุกประการและให้คลื่นที่มีเฟสเริ่มต้นตรงกัน โดย ณ ขณะเวลาที่แสดงหน้าคลื่นในรูป คลื่น ณ ตำแหน่ง S_1 กับ S_2 เป็นสันคลื่นทั้งคู่

พิจารณาจุด A ในรูป 9.25 ระยะทางที่คลื่นจากแหล่งกำเนิด S_1 ถึงจุด A มีค่าเท่ากับ 5 เท่าของความยาวคลื่น หรือ $S_1A = 5\lambda$ ขณะเดียวกันระยะทางที่คลื่นจากแหล่งกำเนิด S_2 ถึงจุด A มีค่าเท่ากับ 6 เท่าของความยาวคลื่น หรือ $S_2A = 6\lambda$ รูปร่างคลื่นจาก S_1 และ S_2 ที่มาพบกันที่จุด A เทียบกันจะเป็นดังแสดงในรูป 9.25 ก. คลื่นรวมที่จุด A การกระจัดสูงสุดของตัวกลางมีค่าเป็น 2 เท่าของแอมพลิจูดของแต่ละคลื่น การซ้อนทับกันของคลื่นทั้งสองที่จุดนี้ จึงเป็นแบบเสริมกัน

ในกรณีของจุด B ในรูป จะเห็นว่า $S_1B = 4.5\lambda$ ขณะเดียวกัน $S_2A = 4.5\lambda$ รูปร่างคลื่นจาก S_1 และ S_2 ที่มาพบกันที่จุด B เทียบกันจะเป็นดังแสดงในรูป 9.25 ข. คลื่นรวมที่จุด B การกระจัดของตัวกลางมีค่าเป็น -2 เท่าของแอมพลิจูดของแต่ละคลื่น การซ้อนทับกันของคลื่นทั้งสองที่จุดนี้ จึงเป็นแบบเสริมกัน

ในกรณีของจุด C ในรูป จะเห็น $S_1C = 5\lambda$ ขณะเดียวกัน $S_2C = 3.5\lambda$ รูปร่างคลื่นจาก S_1 และ S_2 ที่มาพบกันที่จุด C เทียบกันจะเป็นดังแสดงในรูป 9.25 ค. คลื่นรวมที่จุด C การกระจัดของตัวกลางมีค่าเป็นศูนย์ การซ้อนทับกันของคลื่นทั้งสองที่จุดนี้ จึงเป็นแบบหักล้างกัน



รูป 9.25 แสดงรูปร่างคลื่นจากแหล่งกำเนิด S_1 กับ S_2 ที่ A, B และ C

จากตัวอย่างทั้ง 3 กรณีมีข้อสังเกตดังนี้

- สำหรับจุด A ผลต่างของระยะทางที่คลื่น 2 ขบวนเคลื่อนที่ได้จากแหล่งกำเนิด หรือ $|S_1A - S_2A| = |5\lambda - 6\lambda| = 1 \cdot \lambda$ และการซ้อนทับของคลื่น ตรงจุดนี้เป็นแบบเสริมกัน
- ที่จุด B ผลต่างของระยะทางของคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่จนมาถึงจุด B หรือ $|S_1B - S_2B| = |4.5\lambda - 4.5\lambda| = 0 \cdot \lambda$ และการซ้อนทับของคลื่น ตรงจุดนี้เป็นแบบเสริมกัน
- ที่จุด C ผลต่างของระยะทางของคลื่นทั้งสองเคลื่อนที่จนมาถึงจุด C หรือ $|S_1C - S_2C| = |5\lambda - 3.5\lambda| = 1.5 \cdot \lambda$ และการซ้อนทับของคลื่น ตรงจุดนี้เป็นแบบหักล้างกัน

ที่จุด E และ จุด F มีค่าผลต่างระยะทางดังกล่าวเป็นอย่างไร และการแทรกสอดที่เกิดขึ้นเป็นแบบเสริมหรือหักล้าง

ชวนคิด

การแทรกสอดกันของคลื่นที่จุดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่จุดที่สันคลื่น (หรือท้องคลื่น) ซ้อนทับกับสันคลื่น (หรือท้องคลื่น) เป็นการแทรกสอดแบบใด

จากการพิจารณาดังกล่าวพบว่า ที่จุดหนึ่ง ๆ ในระนาบ คลื่นจากทั้ง 2 แหล่งกำเนิดจะเกิดการแทรกสอดหรือซ้อนทับกันได้ โดยระยะทางที่คลื่นแต่ละขบวนเคลื่อนที่มาถึงที่จุด ๆ นั้นไม่จำเป็นต้องเท่ากัน โดยผลต่างระยะทางระหว่างจุดนั้นกับแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสองเรียกว่า **ความต่างระยะทาง** Δr (path difference)

ถ้าจุด P มีผลต่างของระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสองเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น การรวมกันของคลื่นจะเป็นแบบเสริม เกิดเป็นจุดปฏิบัพหรือเขียนเป็นสมการได้ว่า

$\Delta r = |S_1P - S_2P| = n\lambda; \quad n = 0, 1, 2, \ldots$ จุด P จะเป็นจุดปฏิบัพ

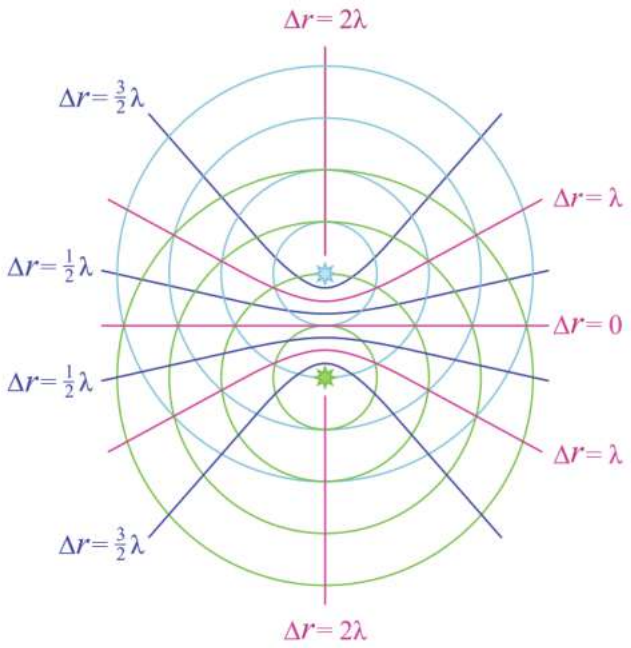
แต่ถ้าจุด Q มีผลต่างของระยะทางจากแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสองเป็นจำนวนเต็มลบด้วยครึ่งเท่าของความยาวคลื่น จุดนั้นจะเป็นจุดที่คลื่นหักล้างกันสนิทเกิดเป็นจุดบัพ เขียนเป็นสมการได้ว่า

$$\Delta r = |S_1Q - S_2Q| = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda; \quad n = 1, 2, \ldots$$ จุด Q จะเป็นจุดบัพ

ชวนคิด

หากเฟสเริ่มต้นของคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีค่าต่างกัน 180 องศา หรือมีเฟสตรงข้ามกัน เงื่อนไขของการแทรกสอดแบบเสริมกับแบบหักล้างจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร เพราะเหตุใด

Δr ที่กำกับ คือผลต่างระยะทางของคลื่นทั้งสองบนแนวที่กำกับ



รูป 9.26 แสดงตัวอย่างของแนวเส้นที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและหักล้างกันของคลื่นจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์ ที่มีเฟสตรงกันและอยู่ห่างกัน 2 เท่าของความยาวคลื่น

รูป 9.26 แสดงการแทรกสอดกันของคลื่นที่มีเฟสตรงกัน เส้นสีน้ำเงินและแดงเส้นเดียวกันเป็นเส้นที่ลากเชื่อมจุดที่มีค่าผลต่างระยะทาง หรือ Δr เท่ากัน เส้นสีน้ำเงินเป็นแนวที่เกิดการแทรกสอดแบบหักล้างกันและเส้นสีแดงเป็นแนวที่เกิดการแทรกสอดแบบเสริม

ชวนคิด

ในรูป 9.26 แสดงเส้นแนวการแทรกสอดกัน แสดงค่า Δr สูงสุดเท่ากับ 2λ มีแนวการแทรกสอดที่ค่า Δr มากกว่า 2λ หรือไม่ เพราะเหตุใด

ชวนคิด

หากเฟสเริ่มต้นของคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีค่าต่างกัน 180 องศาหรือมีเฟสตรงข้ามกัน เส้นแนวการแทรกสอดกันของคลื่นที่จุดซึ่งมีระยะห่างจากแหล่งกำเนิดทั้งสองเท่ากัน จะเกิดการแทรกสอดแบบใด

พฤติกรรมของคลื่นที่ผ่านมา เราได้ศึกษาคลื่นที่กระทบขอบของรอยต่อแล้วเกิดการสะท้อน และการหักเห ถ้าคลื่นกระทบขอบของสิ่งกีดขวางหรือช่องของสิ่งกีดขวาง พฤติกรรมของคลื่นจะเป็นอย่างไร

9.4.4 การเลี้ยวเบนของคลื่น

เมื่อคลื่นกระทบขอบของสิ่งกีดขวางหรือผ่านช่องแคบของสิ่งกีดขวาง พฤติกรรมของคลื่นเป็นอย่างไร

กิจกรรม 9.5 การเลี้ยวเบนของคลื่น

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายสมบัติการเลี้ยวเบนของคลื่น

วัสดุและอุปกรณ์

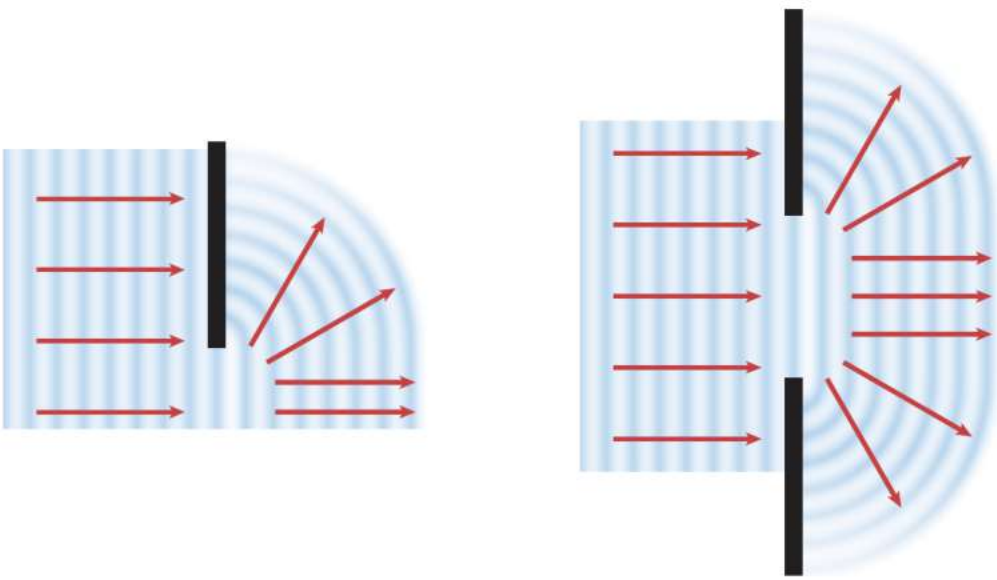
1. ชุดถาดคลื่น 1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำพร้อมสายไฟ 1 ชุด
3. กระดาษขาว 1 แผ่น

วิธีทำกิจกรรม

1. ใส่น้ำในถาดคลื่น วางแผ่นกั้นหน้าตรง ณ บริเวณกลางถาดคลื่นในแนวขนานกับคานกำเนิดคลื่น
2. ทำให้เกิดคลื่นเส้นตรงต่อเนื่องเคลื่อนที่เข้าหาแผ่นกั้น โดยให้หน้าคลื่นขนานกับแผ่นกั้นนั้น สังเกตการเคลื่อนที่ของคลื่นเมื่อผ่านขอบแผ่นกั้น
3. ใช้แผ่นกั้นสองแผ่นทำช่องเปิดที่มีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่น สังเกตลักษณะของคลื่นเมื่อผ่านช่องเปิด
4. ปรับความกว้างของช่องเปิดให้มีความกว้างใกล้เคียงความยาวคลื่น สังเกตลักษณะของคลื่นเมื่อผ่านช่องเปิดไปแล้ว
5. ทำซ้ำโดยปรับความกว้างของช่องเปิดให้น้อยกว่าความยาวคลื่น สังเกตลักษณะของคลื่นเมื่อผ่านช่องเปิดไปแล้ว

คำถามท้ายกิจกรรม

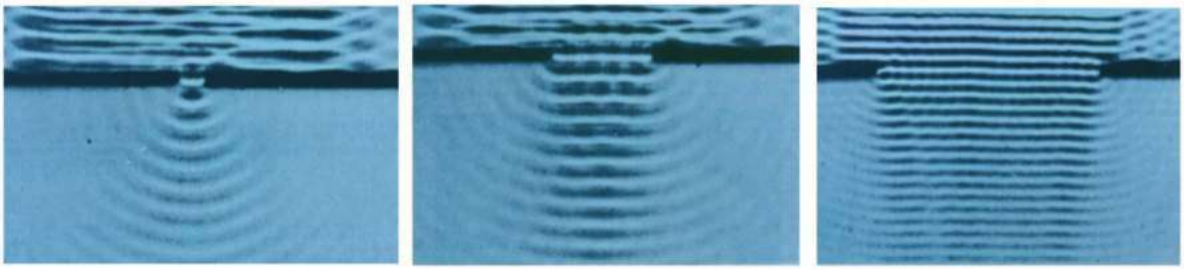
- □ เมื่อใช้แผ่นกั้นขวางการเคลื่อนที่ของคลื่นผิวน้ำบางส่วน บริเวณด้านหลังของแผ่นกั้นคลื่นจะมีการเคลื่อนที่อย่างไร
- □ เมื่อใช้แผ่นกั้นสองแผ่น ทำช่องเปิดที่มีความกว้างมากกว่า ใกล้เคียงและน้อยกว่าความยาวคลื่นของคลื่นผิวน้ำ ในแต่ละครั้งคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านช่องเปิดมีลักษณะอย่างไร



รูป 9.27 แสดงคลื่นระนาบเลี้ยวเบนผ่านขอบของสิ่งกีดขวาง 2 แบบ

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณที่มีสิ่งกีดขวาง ตรงจุดที่เป็นขอบของสิ่งกีดขวาง คลื่นจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ อ้อมขอบของสิ่งกีดขวางไปด้านหลังของสิ่งกีดขวางได้โดยทิศทางของการเคลื่อนที่จะเปลี่ยนไปและแอมพลิจูดของคลื่นที่อ้อมไปนั้นมีค่าน้อยลง แต่ความยาวคลื่นกับความถี่ยังคงเท่าเดิม เราเรียกปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การเลี้ยวเบน** (diffraction)

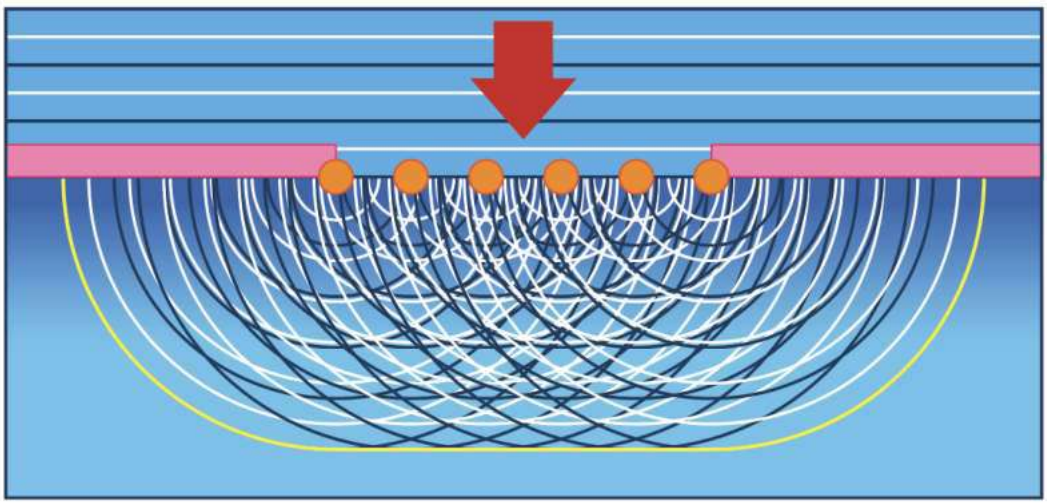
ในรูป 9.27 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นระนาบผ่านสิ่งกีดขวาง 2 แบบ ในรูปด้านซ้าย คลื่นเคลื่อนที่มาถึงเป็นแผ่นกั้นที่มีขอบหนึ่งด้าน ในรูปด้านขวา คลื่นระนาบเคลื่อนที่ผ่านช่องที่มีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่น จะเห็นว่า ในทั้งสองกรณี เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงขอบของสิ่งกีดขวาง คลื่น ณ จุดนั้นจะทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด ตามหลักการของฮอยเกนส์ ทำให้หน้าคลื่นที่แผ่จากจุดที่ขอบนั้น เคลื่อนที่ไปได้โดยมีหน้าคลื่นเป็นส่วนโค้งวงกลม



$d \ll \lambda$ $d \approx \lambda$ $d \gg \lambda$

รูป 9.28 แสดงการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องที่มีขนาดต่างกัน

รูป 9.28 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นระนาบผ่านช่องแคบที่มีความกว้างต่างกัน 4 ค่า สังเกตว่าสำหรับช่องแคบที่มีความกว้างยิ่งน้อยหรือกว้างน้อยกว่าความยาวคลื่น เมื่อคลื่นระนาบเคลื่อนที่ผ่านคลื่นที่ปรากฏด้านหลังจะมีหน้าคลื่นเป็นรูปวงกลม เหมือนกับว่าช่องแคบดังกล่าวทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด



รูป 9.29 แสดงการใช้หลักการของฮอยเกนส์อธิบายการเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบที่มีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่น เส้นสีดำและสีขาว แสดงสันคลื่นและท้องคลื่นตามลำดับ เส้นสีเหลืองแสดงหน้าคลื่นรวม 1 เส้น ที่เกิดขึ้น

จากหลักการของฮอยเกนส์ เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงช่องหรือสิ่งกีดขวาง ทุกจุดบนหน้าคลื่นจะทำตัวเป็นแหล่งกำเนิดจุดใหม่ดังรูป 9.29 ที่ปล่อยคลื่นที่ความยาวคลื่นและความถี่เท่ากับคลื่นเดิม ซึ่งหมายความว่า เกิดการแทรกสอดหรือการรวมกันของคลื่นที่ด้านหลังช่องหรือสิ่งกีดขวางได้

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 9.4

พิจารณาคลื่นดลในเส้นเชือกที่ต่อกัน 2 เส้นในรูป 9.18 แล้วเปรียบเทียบอัตราเร็วของคลื่นตกกระทบ คลื่นสะท้อน และคลื่นหักเหว่าเท่ากันหรือไม่ ถ้าไม่เท่ากัน ให้เรียงลำดับอัตราเร็วของคลื่นจากมากไปหาน้อย

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

9.1 ธรรมชาติของคลื่น

- คลื่นเป็นรูปแบบของการถ่ายโอนพลังงานจากแหล่งกำเนิดออกไปยังบริเวณรอบ ๆ
- แหล่งกำเนิดคลื่นเป็นสิ่งที่ให้พลังงานรบกวนตัวกลางทำให้อนุภาคของตัวกลางสั่นอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่ง และถ่ายโอนพลังงานออกไปโดยที่อนุภาคของตัวกลางไม่มีการเคลื่อนที่ไปกับคลื่น
- คลื่นที่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานเรียกว่า**คลื่นกล** คลื่นที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการถ่ายโอนพลังงานแต่อาศัยการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเรียกว่า **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** คลื่นที่ทำให้ตัวกลางสั่นในทิศตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเรียกว่า**คลื่นตามขวาง** คลื่นที่ทำให้ตัวกลางสั่นในทิศขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเรียกว่า**คลื่นตามยาว** คลื่นที่เกิดขึ้นไม่ต่อเนื่องเรียกว่า**คลื่นดล** คลื่นที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเรียกว่า**คลื่นต่อเนื่อง**
- ส่วนประกอบของคลื่นได้แก่ การกระจัด แอมพลิจูด สันคลื่น ท้องคลื่น เฟส ความถี่ คาบ ความยาวคลื่น

9.2 อัตราเร็วคลื่น

- อัตราเร็วของคลื่น มีความสัมพันธ์กับส่วนประกอบของคลื่นตามสมการ $v = f\lambda$
- อัตราเร็วคลื่นกลขึ้นอยู่กับสมบัติของตัวกลาง เช่น อัตราเร็วคลื่นในเชือกขึ้นอยู่กับแรงดึงในเชือกและมวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเชือก
- จุดสองจุดบนคลื่นห่างกันหนึ่งความยาวคลื่นสองจุดนั้นมีเฟสต่างกัน 2π หรือ 360 องศา ดังนั้นความต่างเฟสของจุดสองจุดบนคลื่นหาได้จาก $\Delta\phi = \frac{\Delta x}{\lambda}(360°)$

9.3 หลักการที่เกี่ยวกับคลื่น

- หลักการของฮอยเกนส์ (Huygens' principle) กล่าวว่า แต่ละจุดบนหน้าคลื่นเป็นแหล่งกำเนิดแบบจุด ที่ทำให้เกิดหน้าคลื่นรูปวงกลมใหม่ซึ่งส่งคลื่นออกไป โดยคลื่นใหม่นี้จะมีอัตราเร็วและความถี่เท่ากับคลื่นเดิม หน้าคลื่นใหม่หาได้จากการลากเส้นสัมผัสที่เชื่อมหน้าคลื่นวงกลมด้านหน้าของแหล่งกำเนิดจุดที่เกิดขึ้น ณ เวลาเดียวกัน
- หลักการซ้อนทับ กล่าวว่า เมื่อคลื่น 2 คลื่น เคลื่อนที่มาซ้อนทับกัน คลื่นรวมจะมีการกระจัดของตัวกลางที่แต่ละตำแหน่ง ณ เวลาหนึ่งๆ เท่ากับผลบวกของการกระจัดของตัวกลางที่เกิดจากแต่ละคลื่นที่ตำแหน่งและเวลานั้น ๆ

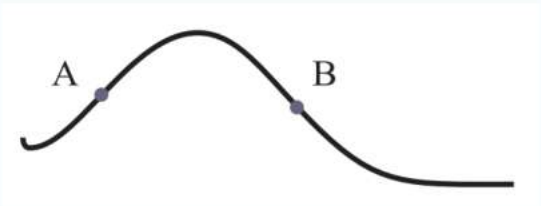
9.4 พฤติกรรมของคลื่น

- คลื่นแสดงพฤติกรรมการสะท้อนเมื่อกระทบสิ่งกีดขวางหรือรอยต่อของตัวกลางที่ต่างกัน การสะท้อนของคลื่นเป็นไปตามกฎการสะท้อน คือมุมสะท้อน=มุมตกกระทบ คลื่นสะท้อนในเชือกจะกลับเฟสเมื่อปลายเชือกตรึงแน่น และคลื่นสะท้อนในเชือกมีเฟสคงเดิม เมื่อปลายเชือกอิสระ
- คลื่นเกิดการหักเหเมื่อเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อของตัวกลางที่ต่างกัน โดยคลื่นมีความถี่คงที่ แต่อัตราเร็วคลื่นเปลี่ยนไปเป็นไปตามกฎการหักเห แทนด้วยสมการ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{v_1}{v_2}$
- เมื่อคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่มาพบกันเกิดการแทรกสอดกัน ถ้าคลื่นจากแหล่งกำเนิด S_1 และ S_2 มีความถี่เท่ากัน เฟสตรงกัน แอมพลิจูดเท่ากัน เมื่อแทรกสอดกันเกิดตำแหน่งที่รวมแบบเสริมเรียกว่า ปฏิบัพและแบบหักล้างเรียกว่า บัพ โดยตำแหน่งที่เกิดปฏิบัพเป็นไปตามสมการ $|S_1P-S_2P|=n\lambda$ เมื่อ $n=0, 1, 2, 3, \ldots$ และตำแหน่งที่เกิดบัพเป็นไปตามสมการ $|S_1Q-S_2Q|=\left(n-\frac{1}{2}\right)\lambda$ เมื่อ $n=1, 2, 3, \ldots$
- คลื่นอาพันธ์สองขบวนเคลื่อนที่สวนทางกันจะเกิดการแทรกสอดเกิดเป็นปฏิบัพและบัพที่อยู่นิ่งโดยมีระยะระหว่างบัพที่ถัดกัน และปฏิบัพที่ถัดกันเท่ากับครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น เรียกว่า คลื่นนิ่ง
- คลื่นเกิดการเลี้ยวเบนเมื่อเคลื่อนที่พบขอบของสิ่งกีดขวางหรือช่องแคบ แล้วมีคลื่นแผ่ออกจากขอบของสิ่งกีดขวางไปทางด้านหลังได้

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9

คำถาม

1. ความเร็วคลื่นในเส้นเชือกแตกต่างจากความเร็วอนุภาคเล็กในเส้นเชือกอย่างไร
2. คลื่นผิวน้ำในน้ำที่มีความลึกคงตัว และน้อยกว่าความยาวคลื่นจะมีความยาวคลื่นจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร เมื่อความถี่ของคลื่นเป็นสองเท่าของความถี่เดิม ความเร็วของคลื่นมีค่าคงตัว
3. อัตราเร็วของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปหรือไม่ อย่างไร เมื่อความถี่เพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าและผ่านตัวกลางเดิม
4. เชือกเส้นใหญ่มีมวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวมากกว่าเชือกเส้นเล็ก เมื่อนำมาต่อกันให้คลื่นผ่านจากเชือกเส้นใหญ่เข้าสู่เชือกเส้นเล็ก อัตราเร็ว ความถี่ และความยาวคลื่น เปลี่ยนแปลงหรือไม่อย่างไร
5. คลื่นดลสองลูกเคลื่อนที่ในเชือกเข้าหากัน เมื่อพบกันจะเกิดการสะท้อนจากคลื่นอีกลูกหนึ่งหรือไม่ อธิบาย
6. เมื่อคลื่นมาซ้อนทับกัน เงื่อนไขต้องเป็นอย่างไรเมื่อ
   ก. แอมพลิจูดของคลื่นรวมมีค่ามากกว่าคลื่นที่มารวมกัน
   ข. แอมพลิจูดของคลื่นรวมมีค่าน้อยกว่าคลื่นที่มารวมกัน
   ค. แอมพลิจูดของคลื่นรวมมีค่าเท่ากับศูนย์
7. ในการแทรกสอดของคลื่นแบบเสริมและแบบหักล้าง พลังงานเพิ่มขึ้นหรือสูญหายไปหรือไม่ อธิบาย
8. คลื่นสองคลื่นความถี่เท่ากัน อยู่ในตัวกลางเดียวกัน แต่แอมพลิจูดต่างกัน เมื่อมาแทรกสอดกัน เฟสของคลื่นทั้งสองต้องต่างกันเท่าไรจึงจะทำให้แอมพลิจูดของคลื่นรวมมีค่ามากที่สุด และน้อยที่สุดตามลำดับและค่าแอมพลิจูดรวมของคลื่นในแต่ละกรณีเป็นเท่าไร
9. จากภาพแสดงคลื่นในเชือกกำลังเคลื่อนไปทางซ้ายด้วยอัตราเร็ว 10 เมตรต่อวินาที A และ B เป็นอนุภาคเล็กในเส้นเชือก



รูป ประกอบคำถามข้อ 9

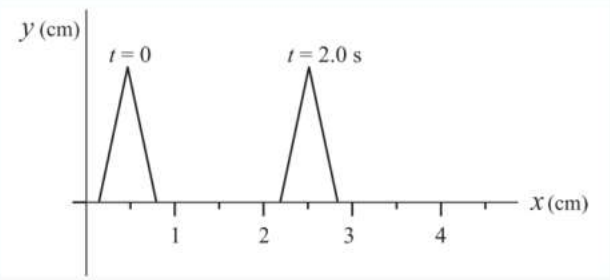
จุด A และ B เคลื่อนที่อย่างไร และความเร็วของจุดทั้งสองเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ปัญหา

1. ดึงสายยางท่อน้ำเส้นเล็กให้ตรง ดีดสายยางให้สั่น สังเกตลูกคลื่นที่เกิดขึ้นในสายยาง อัตราเร็วของลูกคลื่นในสายยางจะเปลี่ยนแปลงหรือไม่ อย่างไร เมื่อ
   ก. ดึงสายยางให้ตึงมากขึ้น
   ข. กรอกน้ำให้เต็มสายยาง
2. ความยาวคลื่นในเส้นเชือกมีความสัมพันธ์กับสิ่งใดต่อไปนี้ ความยาวเชือก แรงดึงในเส้นเชือก มวลต่อหนึ่งหน่วยความยาวของเชือก จงอธิบายความสัมพันธ์นั้น
3. คลื่นผิวน้ำผ่านเสาที่ปักอยู่ในน้ำด้วยความเร็ว 2.8 เมตรต่อวินาที และมีสันคลื่นอยู่ห่างกัน 5 เมตร ระดับน้ำที่เสาจะกระเพื่อมขึ้นลงด้วยความถี่เท่าไร
4. ใบไม้ลอยในน้ำเมื่อมีคลื่นผ่านจะกระเพื่อมขึ้นลง 15 รอบในเวลา 0.5 วินาทีและสันคลื่นห่างกัน 2 เมตร อัตราเร็วคลื่นในน้ำขณะนั้นเป็นเท่าไร

ปัญหาท้าทาย

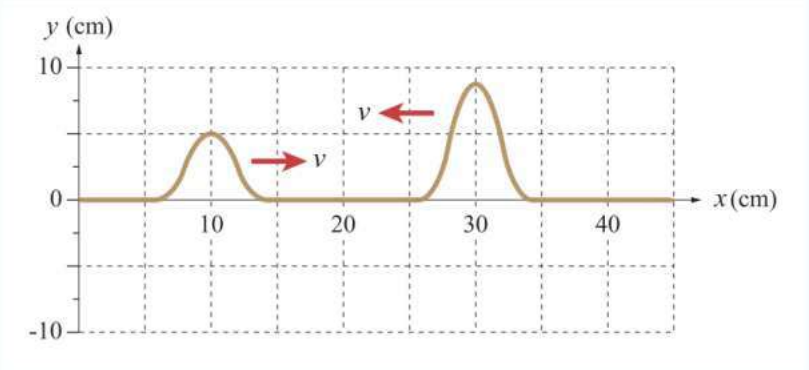
5. เชือกเส้นหนึ่งถูกสะบัดปลายเชือกอย่างสม่ำเสมอ 50 รอบในเวลา 20 วินาที และทำให้คลื่นผ่านเชือกเป็นระยะทาง 10 เมตร ความยาวคลื่นในเส้นเชือกนี้เป็นเท่าไร
6. ภาพแสดงคลื่นดลผ่านตัวกลางชนิดหนึ่ง



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 6

ก. คลื่นดลนี้มีความเร็วเท่าไร
ข. เมื่อเวลา $t = 3$ s คลื่นดลนี้จะอยู่ที่ตำแหน่งใด

7. คลื่นกลผ่านตัวกลางแรกด้วยความเร็ว 4 เมตรต่อวินาทีตกกระทบรอยต่อของตัวกลางด้วยมุมตกกระทบขนาด 30 องศาและผ่านเข้าสู่ตัวกลางที่สองด้วยมุมหักเห 45 องศา ความเร็วคลื่นในตัวกลางที่สองเป็นเท่าไร
8. ที่เวลา $t = 0$ คลื่นเคลื่อนที่เข้าหากันด้วยความเร็ว 1.0 เมตรต่อวินาที ดังรูป

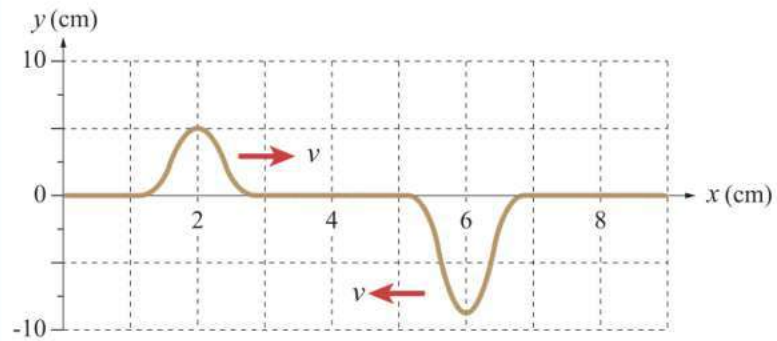


รูป ประกอบคำถามข้อ 8

ก. อีกนานเท่าไรคลื่นทั้งสองจึงจะซ้อนทับกันพอดี

ข. จงวาดภาพการรวมกันของคลื่นทั้งสองที่เวลา $t = 0.1$ s และ $t = 0.2$ s

9. ที่เวลา $t = 0$ คลื่นดลเคลื่อนที่เข้าหากัน ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 9

ก. ที่เวลา $t = 1$ s คลื่นทั้งสองซ้อนทับกันได้พอดี ความเร็วคลื่นเป็นเท่าไร

ข. จงวาดภาพการรวมกันของคลื่นทั้งสองที่เวลา $t = 1$ s และ $t = 2$ s

10. คลื่นผิวน้ำในถาดคลื่นเกิดจากแหล่งกำเนิดคลื่นสั่นด้วยความถี่ 50 รอบต่อวินาทีและคลื่นแผ่ออกไปด้วยความเร็ว 1.0 เมตรต่อวินาที ตำแหน่งของคลื่นผิวน้ำที่มีเฟสต่างกัน 180 องศาอยู่ห่างกันเท่าไร
11. เมื่อมองฉากรับภาพใต้ถาดคลื่น เห็นภาพคลื่นมีแถบสว่างห่างกัน 1.5 เซนติเมตร เมื่อคลื่นผ่านน้ำบริเวณที่มีกระจกใสจมอยู่ มองเห็นแถบสว่างห่างกัน 1 เซนติเมตร อัตราส่วนความเร็วของคลื่นในถาดคลื่นกับคลื่นที่ผ่านน้ำที่มีกระจกใสจมอยู่เป็นเท่าไร

บทที่ 10 แสงเชิงคลื่น

ipst.me/8889

เราเห็นปรากฏการณ์ของแสงบางอย่าง เช่น แสงที่มีหลากสีสวยงามบนฟองสบู่ บนแผ่นซีดี และจากโอปอ ซึ่งเกิดจากพฤติกรรมของแสง พฤติกรรมใดของแสงทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว นักเรียนจะได้ศึกษาในบทนี้

คำถามสำคัญ

- การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงมีลักษณะและรูปแบบอย่างไร
- การเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

10.1 แนวคิดเกี่ยวกับแสงเชิงคลื่น

1. ระบุได้ว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตามองเห็นได้

10.2 การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

2. อธิบายรูปแบบการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่
3. คำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

10.3 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

4. อธิบายรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างขนาดต่าง ๆ
5. คำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

10.4 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติง

6. อธิบายรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติง
7. คำนวณหาความยาวคลื่นแสงและปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยใช้เกรตติง

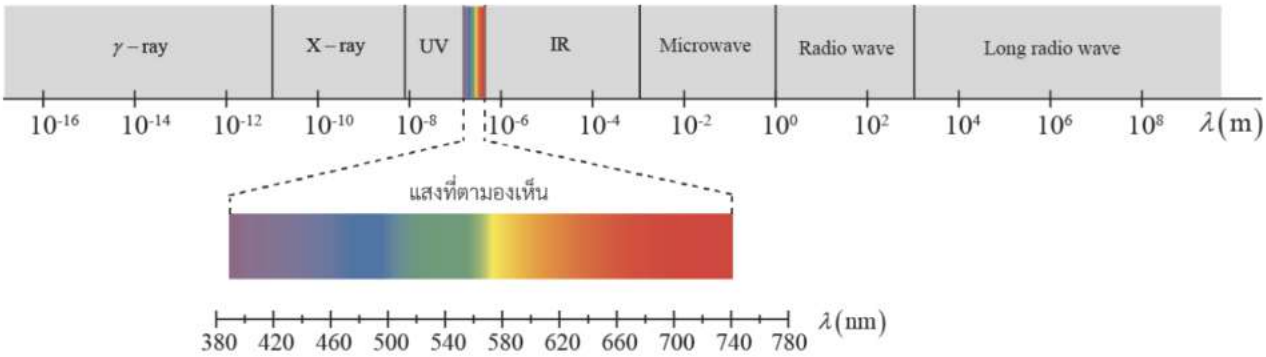
ความรู้ก่อนเรียน

สเปกตรัมของแสง การรวมกันได้ของคลื่น การแทรกสอดของคลื่น การเลี้ยวเบนของคลื่น

ในบทเรียนที่ผ่านมา เราได้ทราบพฤติกรรมของคลื่นที่แตกต่างจากพฤติกรรมของอนุภาค คือ คลื่นเกิดการแทรกสอด และการเลี้ยวเบนได้ ในบทนี้ จะได้ศึกษาปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แสงประพฤติตัวเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง

10.1 แนวคิดเกี่ยวกับแสงเชิงคลื่น

คลื่นแสงหรือเรียกสั้น ๆ ว่า แสง นั้นเป็นคลื่นชนิดที่แตกต่างจากคลื่นเสียงหรือคลื่นผิวน้ำซึ่งเป็นคลื่นกลที่ต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่านพลังงานตามที่ได้ศึกษามาแล้ว ส่วนแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการส่งผ่านพลังงาน เมื่อกล่าวถึงแสง เราจะหมายถึงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามนุษย์สามารถตอบสนองได้หรือในช่วงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 400 – 700 นาโนเมตร ดังรูป 10.1 แสงทุกช่วงความถี่ (หรือกล่าวโดยทั่วไป คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกย่านความถี่) เคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วเท่ากันในสุญญากาศ เราจึงอาจใช้แสงเป็นตัวแทนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อกล่าวถึงอัตราเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยอัตราเร็วในสุญญากาศมีค่าประมาณ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ซึ่งตราบจนถึงปัจจุบันพบว่าเป็นอัตราเร็วสูงสุด ไม่มีคลื่นหรืออนุภาคใด ๆ เคลื่อนที่ในสุญญากาศด้วยอัตราเร็วเท่าหรือมากกว่าแสง



รูป 10.1 สเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

อย่างไรก็ตาม กว่าที่แนวคิดเรื่องแสงเป็นคลื่นจะเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายในหมู่นักวิทยาศาสตร์นั้นก็ไม่ใช่เรื่องง่ายนัก เนื่องจากนักวิทยาศาสตร์คนสำคัญในยุคนั้นได้เสนอแนวคิดว่าแสงเป็นอนุภาค และสามารถใช้แนวคิดนี้ในการอธิบายการสะท้อนและการหักเหของแสงได้ในระดับหนึ่ง นักวิทยาศาสตร์ท่านนั้นก็คือ นิวตัน ถึงแม้จะมีการเสนอแนวคิดเรื่องแสงเป็นคลื่นจากนักวิทยาศาสตร์ท่านอื่น เช่น ฮอยเกนส์ ซึ่งก็สามารถใช้แนวคิดของเขาอธิบายการสะท้อนและการหักเหของแสงได้เช่นกัน แต่ความมีชื่อเสียงของนิวตันก็เป็นอุปสรรคต่อการยอมรับแนวคิดเรื่องแสงเป็นคลื่น

จนกระทั่ง ธอมัส ยัง (Thomas Young) ได้ทำการทดลองโดยแสดงให้เห็นว่าแสงเกิดการแทรกสอดได้เช่นเดียวกันกับคลื่นน้ำ และคำนวณหาความยาวคลื่นของแสงได้ แนวคิดเรื่องแสงเป็นคลื่นจึงได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง นี่คือตัวอย่างหนึ่งของการศึกษาวิทยาศาสตร์ เมื่อแนวคิดที่ยอมรับในขณะนั้น

ไม่สอดคล้องกับหลักฐานหรือผลการทดลองใหม่ที่ปรากฏ หรือไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์นั้น ๆ ได้ แนวคิดอื่นที่สามารถอธิบายปรากฏการณ์นั้นได้ดีกว่าก็จะเป็นที่ยอมรับในที่สุด ความมีชื่อเสียงของนักวิทยาศาสตร์คนใดคนหนึ่งไม่อาจอยู่เหนือความเป็นจริงของธรรมชาติได้

ความรู้เพิ่มเติม

ธอมัส ยัง (Thomas Young ค.ศ. 1773 -1829 หรือ พ.ศ. 2316 - 2372) เกิดที่เมืองมิลเวอร์ตัน ประเทศอังกฤษ เขาได้พิสูจน์โดยการทดลองว่าแสงเป็นคลื่นเพราะ แสงมีสมบัติการแทรกสอด (interference) เช่นเดียวกับคลื่นน้ำ คลื่นเสียง และคลื่นชนิดอื่น ๆ

ข้อสังเกต

เมื่อได้ศึกษาต่อไปจะพบว่า แนวคิดเรื่องแสงเป็นอนุภาคนั้นไม่ใช่แนวคิดที่ผิด ในการศึกษาฟิสิกส์ระดับอะตอม แสงสามารถประพฤติตัวเป็นอนุภาคได้ ในทำนองกลับกัน อิเล็กตรอนซึ่งถือว่าเป็นอนุภาคชนิดหนึ่ง ก็สามารถประพฤติตัวเป็นคลื่นได้เช่นกัน

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 10.1

1. พฤติกรรมใดที่แสดงว่าแสงเป็นคลื่น
2. มนุษย์สามารถรับรู้คลื่นแสงได้อย่างไร

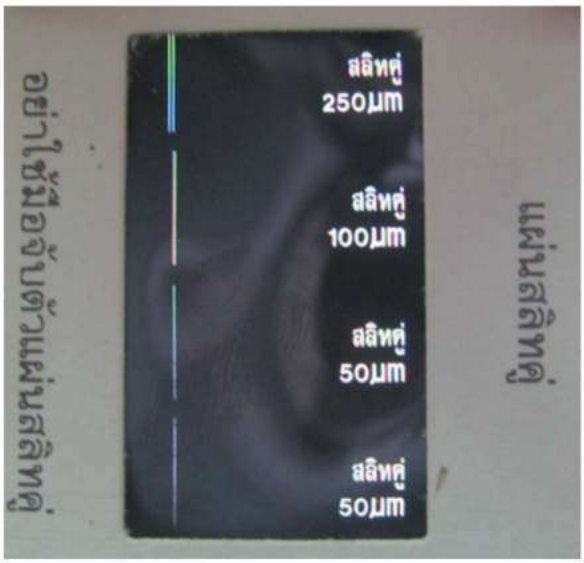
ในหัวข้อต่อไปนักเรียนจะได้ทำการทดลองและศึกษาการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่ว่ามีลักษณะและเงื่อนไขอย่างไร

10.2 การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

เราได้สังเกตและทดลองปรากฏการณ์การแทรกสอดของแหล่งกำเนิดอาพันธ์ของคลื่นผิวน้ำมาแล้ว ต่อไปจะได้ทำการทดลองและศึกษาการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่ว่ามีลักษณะและเงื่อนไขเช่นเดียวกับคลื่นผิวน้ำหรือไม่

สลิตเป็นอุปกรณ์ทางแสงมีลักษณะเป็นช่องเปิดขนาดเล็กที่มีความกว้างน้อย ๆ ค่าหนึ่ง หากมีช่องเดียวเรียกว่า **สลิตเดี่ยว** (single slit) หากมี 2 ช่อง ใกล้กันเรียกว่า **สลิตคู่** (double slit) ดังรูป 10.2

รูป 10.2 ก. สลิตเดี่ยว



รูป 10.2 ข. สลิตคู่

เมื่อให้แสงเดินทางผ่านสลิตคู่ไปตกกระทบบนฉากที่อยู่ห่างออกไป ภาพที่ปรากฏบนฉากจะมีลักษณะเช่นใด จะมองเห็นเป็นจุด 2 จุด หรือมีลักษณะเป็นอย่างอื่น จะได้ศึกษาจากการทดลองต่อไปนี้

กิจกรรม 10.1 การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายรูปแบบการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

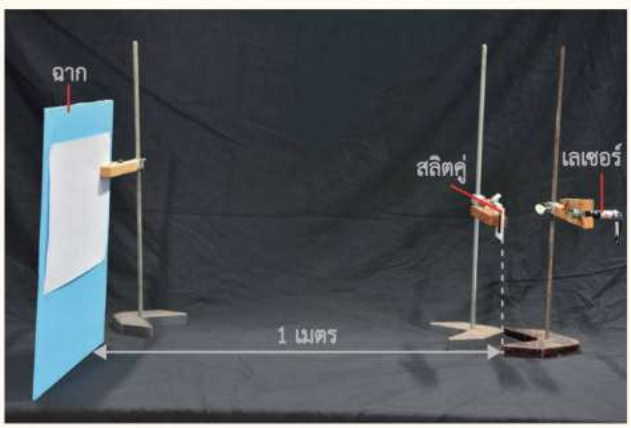
วัสดุและอุปกรณ์

1. เลเซอร์พอยเตอร์ชนิดสีแดง* 1 อัน
2. เลเซอร์พอยเตอร์ชนิดสีเขียว* 1 อัน
3. สลิตคู่ 1 แผ่น
4. ไม้เมตร 1 อัน
5. แท่นยึด 3 ชุด
6. ฉาก 1 แผ่น
7. อุปกรณ์บันทึกภาพ 1 เครื่อง

*ควรมีกำลังไม่เกิน 2200 มิลลิวัตต์ และหลีกเลี่ยงการชี้แสงเลเซอร์ไปยังนัยน์ตาของตนเองหรือผู้อื่นเพราะเป็นอันตรายต่อนัยน์ตา

วิธีทำกิจกรรม

1. ยึดเลเซอร์พอยเตอร์และสลิตคู่กับแท่นยึด ดังรูป
2. จัดให้ระยะห่างระหว่างสลิตกับฉาก ห่างกันอย่างน้อย 1 เมตร
3. ฉายแสงเลเซอร์สีแดงผ่านสลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่องค่าหนึ่ง สังเกตและบันทึกภาพที่ปรากฏบนฉาก
4. ทดลองซ้ำโดยใช้สลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่องค่าอื่น ๆ
5. ทดลองซ้ำข้อ 3. และ 4. แต่เปลี่ยนเป็นเลเซอร์สีเขียว

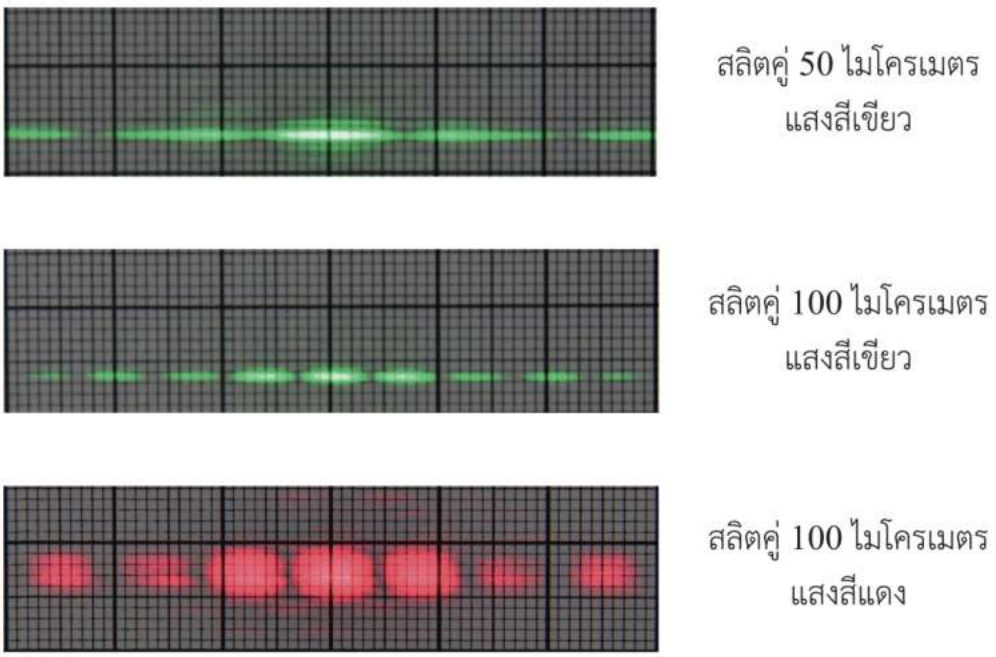


รูป การจัดอุปกรณ์แสดงการแทรกสอดของแสงจากสลิตคู่

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ในกรณีที่ใช้แสงเลเซอร์สีแดงผ่านสลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่องต่างกันภาพที่ปรากฏบนฉากมีลักษณะอย่างไร มีความแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร
- ☐ ภาพการแทรกสอดของแสงที่ได้จากกรณีที่ใช้แสงเลเซอร์สีเขียวแตกต่างจาก กรณีที่ใช้แสงเลเซอร์สีแดงหรือไม่ อย่างไร

จากผลการทดลอง นักเรียนจะสังเกตเห็นแสงบนฉากดังรูป 10.3

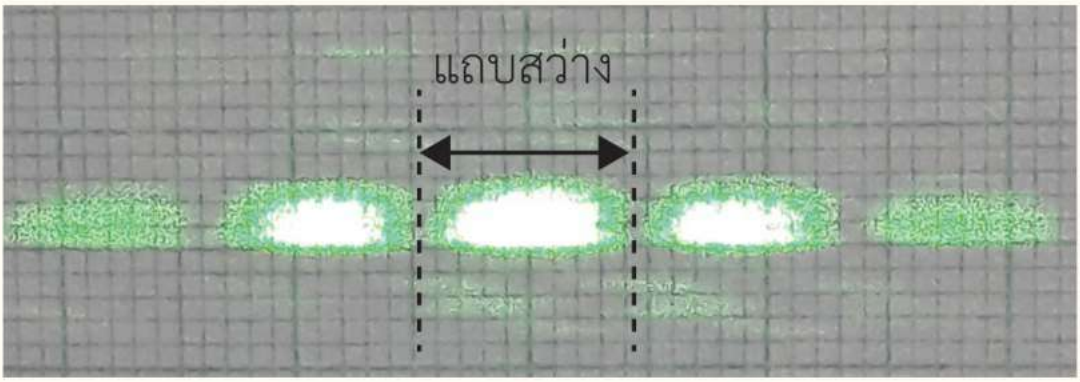


รูป 10.3 การแทรกสอดของแสงจากสลิตคู่ของแสงสีเดียว

จากรูป ความสว่างของแสงที่ปรากฏบนฉากมีการเปลี่ยนแปลงจากสว่างมาก และลดลงจนสว่างน้อย โดยเปลี่ยนแปลงต่อเนื่องไปบนฉาก ซึ่งแถบสว่างแต่ละแถบมีขนาดใกล้เคียงกัน ทำให้เกิดแถบสว่างและแถบมืดบนฉาก (คล้ายกับการเกิดปฏิบัพและบัพจากการแทรกสอดของคลื่นผิวน้ำ ตามลำดับ) โดยทั้งแสงสีแดงและแสงสีเขียวปรากฏแถบสว่างและแถบมืดเช่นเดียวกัน เมื่อระยะระหว่างช่องมีค่ามากขึ้น ความกว้างของแถบสว่างจะมีค่าน้อยลง เมื่อระยะห่างระหว่างช่องของสลิตคู่เท่ากัน ความกว้างของแถบสว่างของแสงสีแดงจะมากกว่าแสงสีเขียว

ข้อสังเกต

ความกว้างของแถบสว่าง ความยาวที่วัดจากตำแหน่งที่มีความสว่างน้อยถึงตำแหน่งที่มีความสว่างน้อยที่อยู่ถัดกันเรียกว่า ความกว้างของแถบสว่าง



รูป ความกว้างของแถบสว่าง

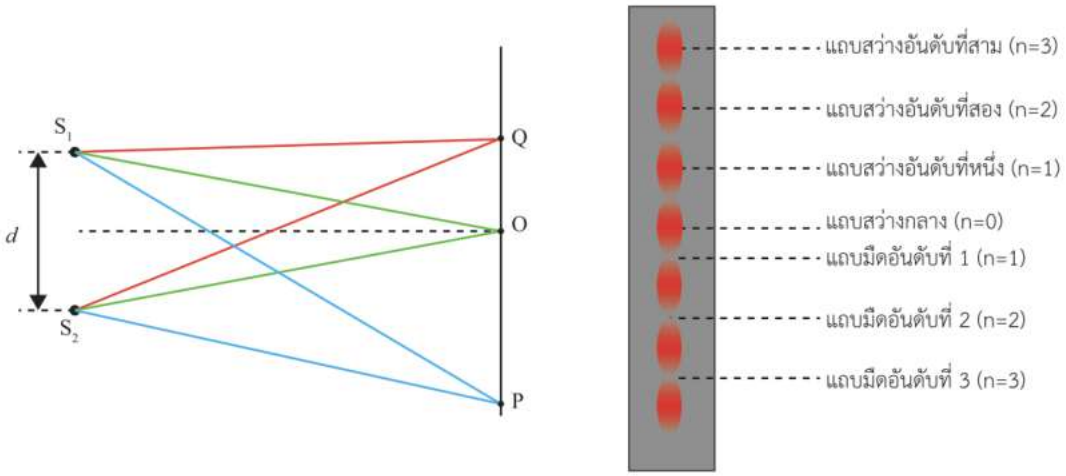
ชวนคิด

ใช้เลเซอร์พอยเตอร์สีม่วง และสีเขียวฉายแสงผ่านสลิตคู่ที่มีระยะห่างเท่ากัน ความกว้างของแถบสว่างเนื่องจากแสงเลเซอร์สีม่วงและแสงเลเซอร์สีเขียวแตกต่างกันหรือไม่ อย่างไร

ปรากฏการณ์นี้ถ้าอธิบายด้วยแนวคิดที่ว่า แสงเดินทางเป็นเส้นตรง ซึ่งตามแนวคิดนั้น เมื่อแสงเดินทางผ่านช่องเปิด 2 ช่อง ก็น่าจะปรากฏเป็นแถบสว่าง 2 แถบบนฉากในแนวที่ตรงกับช่องเปิด 2 ช่องนั้น แนวคิดเรื่องแสงเดินทางเป็นเส้นตรงจึงไม่เพียงพอที่จะอธิบายปรากฏการณ์นี้ได้

แนวคิดหลักในการอธิบายปรากฏการณ์นี้ก็คือ การแทรกสอดของแสงโดย ช่องเล็ก ๆ ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสง และคลื่นแสง 2 ขบวนหรือมากกว่า ที่เดินทางมาพบกัน ณ ตำแหน่งหนึ่งบนฉากทำให้เกิดการรวมคลื่นแบบเสริมและแบบหักล้าง พิจารณาได้จาก ความต่างระยะทางเดินของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงถึงตำแหน่งที่พิจารณา ในกรณีแหล่งกำเนิดคลื่นแสงอาพันธ์เฟสตรงกันแบบจุด ศึกษาการแทรกสอดของแสงได้ดังต่อไปนี้

พิจารณา S_1 และ S_2 เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแสงอาพันธ์แบบจุด ซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ทำให้ปรากฏแถบสว่าง-แถบมืดบนฉากที่อยู่ห่างออกไป ดังรูป 10.4



รูป 10.4 แผนภาพแสดงเฉพาะทางเดินของคลื่นจากแหล่งกำเนิดไปยังตำแหน่ง O P และ Q บนฉาก

ข้อสังเกต

รังสีของแสงที่แผ่ออกจากแหล่งกำเนิดทั้งสองมีจำนวนนับไม่ถ้วน ในที่นี้เราเขียนแสดงเส้นทางเดินของแสงจากแหล่งกำเนิดไปยังจุดทั้งสามบนฉากเพียง 3 คู่เท่านั้นในการอธิบาย

กำหนดให้ O P และ Q เป็นตำแหน่งบนฉากที่อยู่ห่างออกไปจากแหล่งกำเนิดคลื่นทั้งสอง ความต่างระยะทาง (Δr) ของคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองไปยังจุด O P และ Q บนฉาก คือ

จากแหล่งกำเนิดทั้งสองถึงจุด O $\Delta r = |S_1O - S_2O|$

จากแหล่งกำเนิดทั้งสองถึงจุด P $\Delta r = |S_1P - S_2P|$

จากแหล่งกำเนิดทั้งสองถึงจุด Q $\Delta r = |S_1Q - S_2Q|$

นอกจากการพิจารณาความต่างระยะทางแล้ว ยังสามารถพิจารณาความต่างเฟส $(\Delta\phi)$ ของคลื่นจากสองแหล่งกำเนิดเมื่อไปถึงตำแหน่งที่พิจารณาบนฉากได้เช่นกัน จากที่นักเรียนได้ศึกษาผ่านมาในบทคลื่น จะได้ว่า

$$\Delta\phi = \Delta r\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$$

ตัวอย่าง 10.1 แหล่งกำเนิดอาพันธ์สองแหล่ง S_1 และ S_2 ให้แสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร กระทบฉากที่จุด P จงหาความต่างเฟสระหว่างแสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสอง สำหรับแต่ละกรณีต่อไปนี้

ก. ระยะ S_1P เท่ากับ 65.00 เซนติเมตร และ S_2P เท่ากับ 65.60 เซนติเมตร

ข. ระยะ S_1P เท่ากับ 120λ และ S_2P เท่ากับ 125.5λ

ก. แนวคิด

หาความต่างระยะทางจาก $\Delta r = |S_1P - S_2P|$

และนำไปหาความต่างเฟสจาก $\Delta\phi = \Delta r\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)$

วิธีทำ

หาความต่างระยะทางจาก $\Delta r = |S_1P - S_2P|$

$$\Delta r = |65.00\,\text{cm} - 65.60\,\text{cm}|$$

$$\Delta r = 0.60\ \text{cm}$$

หาความต่างเฟส $\Delta\phi = \Delta r \times \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\Delta\phi = 0.60\,\text{cm} \times \frac{2\pi}{600\,\text{nm}}$$

$$\Delta\phi = 6.0\times10^{-3}\,\text{m} \times \frac{2\pi}{6.00\times10^{-7}\ \text{m}}$$

$$\Delta\phi = 2\pi\times 10^{4}\ \text{rad}$$

เนื่องจากทุก ๆ ระยะทาง 1λ เฟสจะเปลี่ยนไป 2π เรเดียนหรือ 360 องศา โดยในช่วง 1λ ความต่างเฟสมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 2π เรเดียนหรือ 360 องศา ถัดไปเฟสจะกลับมาซ้ำเดิมอีก ดังนั้น เมื่อความต่างเฟสเป็นจำนวนเต็มเท่าของ 2π จะตอบว่ามีความต่างเฟสเป็น 2π เรเดียน

ตอบ ความต่างเฟสระหว่างแสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองเมื่อไปจุด P เท่ากับ 2π เรเดียน

ข. แนวคิด เช่นเดียวกับข้อ ก.

วิธีทำ หาความต่างระยะทาง $\Delta r = |S_1P - S_2P|$

$$\Delta r = |120.0\lambda - 125.5\lambda|$$

$$\Delta r = 5.5\lambda$$

หาความต่างเฟส $\Delta\phi = \Delta r \times \frac{2\pi}{\lambda}$

$$\Delta\phi = 5.5\lambda \times \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\Delta\phi = 11\pi \text{ rad}$$

เนื่องจากทุก ๆ ระยะทาง 1λ เฟสจะเปลี่ยนไป 2π เรเดียนหรือ 360 องศา ดังนั้น โดยทั่วไปจะตอบความต่างเฟสตั้งแต่ 0 ถึง 2π เรเดียนหรือ 360 องศา นั่นคือ ความต่างเฟสเท่ากับ π เรเดียน

ตอบ ความต่างเฟสระหว่างแสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสองเมื่อไปจุด P เท่ากับ π เรเดียน

ข้อสังเกต

จากตัวอย่าง 10.1 ก. ความยาวคลื่นแสงมีค่าเท่ากับ $\lambda = 600$ นาโนเมตร เมื่อนำความต่างระยะทาง $\Delta r = 0.60$ cm ซึ่งเท่ากับ 10000 เท่าของความยาวคลื่น ($\Delta r = 10000\lambda$) มีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ซึ่งทำให้ความต่างเฟสเป็นจำนวนเต็มเท่าของ 2π และ จากตัวอย่าง 10.1 ข. เมื่อนำความต่างระยะทาง Δr ไปเทียบกับความยาวคลื่นจะมีเศษเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ซึ่งทำให้ความต่างเฟสมีค่าเป็นจำนวนเต็มคี่เท่าของ π

จากข้อสังเกตข้างต้น พิจารณาได้ว่า

เมื่อคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่โดยมีความต่างระยะทางเป็นศูนย์หรือจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น หรือ มีความต่างเฟสเป็นศูนย์หรือเป็นจำนวนเต็มเท่าของ 2π ดังสมการ

$$\Delta r = n\lambda$$

$$\Delta\phi = n(2\pi)$$

เมื่อ n คือ ศูนย์หรือจำนวนเต็มบวก เรียกว่า คลื่นทั้งสองมี**เฟสตรงกัน** (in phase)

เมื่อคลื่นสองขบวนเคลื่อนที่โดยมีความต่างระยะทางเป็นจำนวนครึ่งเท่าของความยาวคลื่น หรือ มีความต่างเฟสเป็นจำนวนคี่เท่าของ π ดังสมการ

$$\Delta r = \frac{m}{2}\lambda$$

$$\Delta\phi = m\,\pi$$

เมื่อ m คือ จำนวนคี่บวก เรียกว่า คลื่นทั้งสองมี**เฟสตรงข้าม** (out of phase)

การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่ค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1803 โดย ธอมัส ยัง เป็นการยืนยันว่าแสงประพฤติตัวแบบคลื่น โดยการให้แสงผ่านช่องเปิดที่มีขนาดเล็กมาก 2 ช่องจนเสมือนว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นอาพันธ์ ช่องเปิดแต่ละช่องจะแผ่หน้าคลื่นไปโดยรอบ เมื่อคลื่นจากแหล่งกำเนิดทั้งสองแผ่ออกไปจึงเกิดการซ้อนทับกัน หาก ณ ตำแหน่งที่คลื่นสองขบวนเดินทางมาพบกัน คลื่นทั้งสองมีเฟสตรงกัน หรือมีความต่างระยะทางเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น คลื่นสองขบวนนี้ก็จะเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ณ ตำแหน่งนั้น คลื่นรวมที่ได้จะมีแอมพลิจูดมากขึ้นเกิดแถบสว่าง แต่หากตำแหน่งที่คลื่นสองขบวนเดินทางมาพบกัน คลื่นทั้งสองมีเฟสตรงข้าม หรือมีความต่างระยะทางเป็นจำนวนครึ่งเท่าของความยาวคลื่น คลื่นสองขบวนนี้ก็จะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้าง ณ ตำแหน่งนั้น คลื่นรวมที่ได้จะมีแอมพลิจูดเป็นศูนย์เกิดแถบมืด สามารถเขียนเงื่อนไขการแทรกสอดแบบเสริม และการแทรกสอดแบบหักล้างได้ดังสมการ (10.1) และ (10.2) ตามลำดับ

การแทรกสอดแบบเสริม

$$\Delta r = n\lambda \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (10.1)$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง

$$\Delta r = \frac{m}{2}\lambda \qquad m = 1, 3, 5, \ldots \qquad (10.2a)$$

หรือ

$$\Delta r = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (10.2b)$$

โดยในกรณีของแถบสว่าง $n = 0$ เรียกว่า แถบสว่างกลาง และ $n = 1, 2, \ldots$ เรียกว่า แถบสว่างอันดับที่หนึ่ง สอง ฯลฯ นับจากแถบสว่างกลาง ตามลำดับ ส่วนในกรณีของแถบมืด $n = 1, 2, \ldots$ เรียกว่า แถบมืดอันดับที่หนึ่ง สอง ฯลฯ นับจากแถบสว่างกลาง ตามลำดับ ดังรูป 10.4

ข้อสังเกต

ค่า m ในสมการ (10.2a) คิดเฉพาะจำนวนคี่เท่านั้น เนื่องจากถ้า m เป็นจำนวนคู่ ค่า Δr จะเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ซึ่งจะเป็นเงื่อนไขของการแทรกสอดแบบเสริม

ความรู้เพิ่มเติม

แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (coherent light source) เป็นแหล่งกำเนิดที่ให้แสงที่มีความถี่เดียวกัน มีเฟสตรงกันหรือมีความต่างเฟสคงที่ ตัวอย่างของแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ เช่น เลเซอร์ แหล่งกำเนิดแสงโดยทั่วไปเป็นแหล่งกำเนิดแสงไม่อาพันธ์ เราสามารถทำให้แสงไม่อาพันธ์มีความเป็นอาพันธ์มากขึ้นโดยการจำกัดให้แสงผ่านช่องเปิดเล็ก ๆ เพื่อกำจัดแสงที่มีความถี่หรือเฟสแตกต่างกันให้มีจำนวนน้อยลง แสงที่ผ่านช่องเปิดออกมาก็จะมีความเป็นอาพันธ์มากขึ้น แต่ความเข้มของแสงที่ได้ก็จะลดน้อยลงเช่นกัน

คลื่นแสงอาพันธ์ ก. คลื่นแสงไม่อาพันธ์ ข.

รูป เปรียบเทียบลักษณะ ก. คลื่นแสงอาพันธ์ และ ข. คลื่นแสงไม่อาพันธ์

ตัวอย่าง 10.2 แสงจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ 2 แหล่ง มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร เดินทางไปพบกันที่จุด ๆ หนึ่งบนฉาก จงหาว่าที่จุดนั้นเป็นตำแหน่งของแถบสว่างหรือแถบมืดอันดับเท่าใด ในกรณีต่อไปนี้

ก. ความต่างระยะทางเท่ากับ 1100 นาโนเมตร

ข. ความต่างระยะทางเท่ากับ 825 นาโนเมตร

ก. แนวคิด

ให้ n' เป็นค่าใด ๆ และ n เป็นอันดับของแถบสว่างหรือแถบมืด ที่พิจารณา เราจะพิจารณาค่า n' จากสมการ $\Delta r = n'\lambda$ ถ้าค่า n' ที่คำนวณได้เป็นจำนวนเต็มหรือมีเศษใกล้เคียงกับจำนวนเต็ม แสดงว่าเป็นแถบสว่างอันดับที่ $n = n'$ แต่ถ้า n' เป็นจำนวนที่มีเศษเป็น 0.5 หรือใกล้เคียงกับ 0.5 แสดงว่าเป็นแถบมืดอันดับที่ $n = n' + \frac{1}{2}$

วิธีทำ

$$\Delta r = n'\lambda$$

$$1100 \text{ nm} = n'(550\text{nm})$$

$$n' = 2$$

ค่า n' ที่คำนวณได้เป็นจำนวนเต็ม $n' = 2 = n$ แสดงว่าเป็นแถบสว่างอันดับที่สอง

ตอบ จุดนั้นเป็นตำแหน่งของแถบสว่างอันดับที่สอง

ข. แนวคิด เช่นเดียวกับ ก.

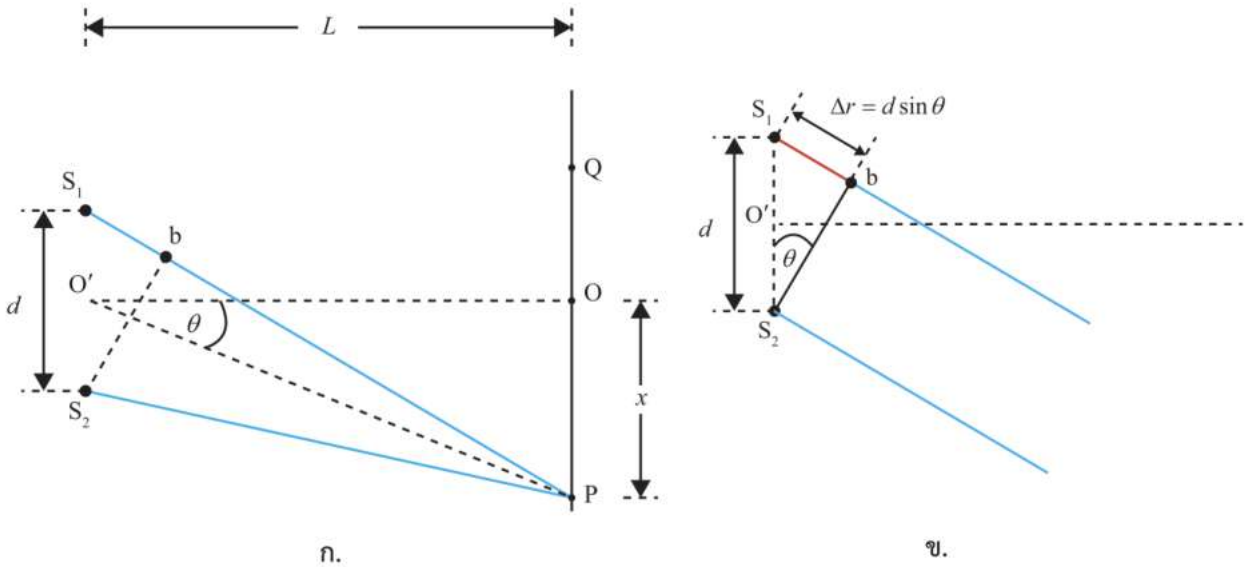
วิธีทำ

$$\Delta r = n'\lambda$$
$$825 \text{ nm} = n'(550\text{nm})$$
$$n' = 1.5$$

ค่า n' ที่คำนวณได้มีเศษเป็น 0.5 แสดงว่าเป็นตำแหน่งของแถบมืด โดย $n = n' + \frac{1}{2}$ ได้เป็น $n = 1.5 + 0.5 = 2$ นั้นคือเป็นแถบมืดอันดับที่สอง

ตอบ จุดนั้นเป็นตำแหน่งของแถบมืดอันดับที่สอง

นอกจากการวัดระยะทางทั้งสองเส้นทางโดยตรงแล้วนำมาหาผลต่างดังสมการ (10.1) และ (10.2) แล้ว ยังสามารถหาความต่างระยะทาง ได้จาก ระยะห่างจากฉากและมุมของตำแหน่งบนฉากเทียบกับแนวสว่างกลางได้ดังนี้



รูป 10.5 แผนภาพแสดงมุมของจุด P บนฉากเทียบกับแนวสว่างกลาง

พิจารณาจุด P บนฉากซึ่งทำมุม θ กับแนวสว่างกลาง O' O ดังรูป 10.5 ก. ให้ระยะ bP เท่ากับ S_2P ความต่างระยะทางของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ S_1 และ S_2 ที่ไปพบกันที่จุด P บนฉากคือระยะ S_1b ดังรูป 10.5 ข. หากระยะห่าง d ระหว่างแหล่งกำเนิดทั้งสองมีค่าน้อยกว่าระยะ L (ซึ่งเป็นระยะระหว่างแนวแหล่งกำเนิดแสงกับฉาก) มาก ๆ สามารถประมาณว่าสามเหลี่ยม S_1bS_2 เป็นสามเหลี่ยมมุมฉากโดยมีระยะ S_1b คือความต่างระยะทางมีค่าเท่ากับ $d\sin\theta$ นั่นคือ แสงจาก S_1 เดินทางไปถึงจุด P โดยมีระยะทางมากกว่าแสงจาก S_2 เป็นระยะเท่ากับ $d\sin\theta$ หรือ $\Delta r = d\sin\theta$ จะได้ว่า

การแทรกสอดแบบเสริม

$$\Delta r = n\lambda$$

$$d\sin\theta = n\lambda \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (10.3)$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง

$$\Delta r = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda$$

$$d\sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad n = 1, 2, 3, \ldots \qquad (10.4)$$

นอกจากนี้ ในกรณีที่มุม θ เป็นมุมเล็ก ๆ ($\theta < 10^{\circ}$) สามารถประมาณว่า

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

สมการ (10.3) และ (10.4) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

การแทรกสอดแบบเสริม

$$d\frac{x}{L} = n\lambda \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (10.5)$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง

$$d\frac{x}{L} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \qquad n = 1, 2, 3 \ldots \qquad (10.6)$$

ข้อสังเกต

สมการ (10.3) และ (10.4) ใช้ได้สำหรับมุม θ ใด ๆ แต่สมการ (10.5) และ (10.6) ใช้ได้สำหรับกรณีที่มุม θ เป็นมุมเล็ก ๆ ($\theta < 10^{\circ}$) ไม่สามารถใช้ได้สำหรับกรณีทั่วไป

ตัวอย่าง 10.3 จงพิจารณาว่า ณ ตำแหน่งบนฉากซึ่งทำมุม θ เทียบกับแนวสว่างกลางในกรณีต่อไปนี้ เป็นแถบสว่างหรือแถบมืด เมื่อกำหนดให้ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 556 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงสองแหล่งเท่ากับ 18 ไมโครเมตร

ก. $\theta = 7.0°$

ข. $\theta = 8.0°$

ก. แนวคิด

ให้ n' เป็นค่าใด ๆ และ n เป็นอันดับของแถบสว่างหรือแถบมืดที่พิจารณา เราจะพิจารณาค่า n' จากสมการ $d\sin\theta = n'\lambda$ ถ้าค่า n' ที่คำนวณได้เป็นจำนวนเต็มหรือมีเศษใกล้เคียงกับจำนวนเต็ม แสดงว่าเป็นแถบสว่างอันดับที่ $n = n'$ แต่ถ้า n' เป็นจำนวนที่มีเศษเป็น 0.5 หรือใกล้เคียงกับ 0.5 แสดงว่าเป็นแถบมืดอันดับที่ $n = n' + \frac{1}{2}$

วิธีทำ

จาก $d\sin\theta = n'\lambda$

แทนค่า $d = 18\times10^{-6}\,\text{m}$ $\sin7° = 0.1219$ และ $\lambda = 556\times10^{-9}\,\text{m}$ จะได้

$$n' = \frac{d\sin\theta}{\lambda}$$

$$n' = \frac{(18\times10^{-6}\,\text{m})(0.1219)}{556\times10^{-9}\,\text{m}}$$

$$= 3.95$$

ค่า n' ที่คำนวณได้ใกล้เคียงกับ 4 ซึ่งประมาณได้ว่า เป็นจำนวนเต็ม $n' \approx 4$ นั่นคือ $n' = n = 4$ หรือ $d\sin\theta = 4\lambda$ ซึ่งตรงกับความสัมพันธ์ของตำแหน่งแถบสว่าง

ตอบ ณ ตำแหน่งบนฉากที่ $\theta = 7.0^{\circ}$ เป็นแถบสว่างอันดับที่สี่

ข. แนวคิด เช่นเดียวกับ ก.

วิธีทำ

จาก $d\sin\theta = n'\lambda$

แทนค่า $d = 18\times10^{-6}$ m $\sin8° = 0.1391$ และ $\lambda = 556\times10^{-9}$ m จะได้

$$n' = \frac{d\sin\theta}{\lambda}$$

$$n' = \frac{(18\times10^{-6}\text{ m})(0.1391)}{556\times10^{-9}\text{ m}}$$

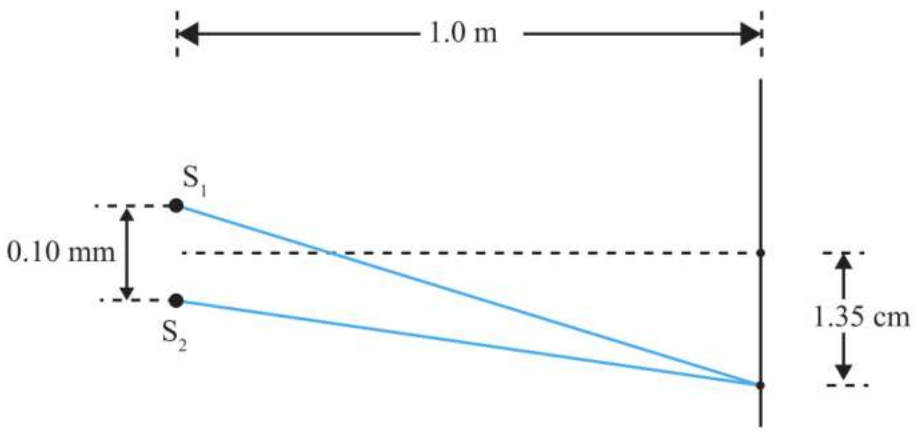
$$= 4.50$$

เนื่องจากค่า n' ที่คำนวณได้มีเศษเป็น 0.5 แสดงว่าเป็นตำแหน่งของแถบมืด
โดย $n = n' + \frac{1}{2} = 4.5+0.5 = 5$ นั่นคือเป็นแถบมืดอันดับที่ 5

ตอบ ณ ตำแหน่งบนฉากที่ $\theta = 8.0°$ เป็นแถบมืดอันดับที่ห้า

ตัวอย่าง 10.4 จงพิจารณาว่า ณ ตำแหน่งบนฉากซึ่งห่างจากแนวสว่างกลาง 1.35 เซนติเมตร เป็นแถบสว่างหรือแถบมืดอันดับที่เท่าใด เมื่อกำหนดให้ความยาวคลื่นแสงเท่ากับ 540 นาโนเมตร ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงเท่ากับ 0.10 มิลลิเมตร และระยะห่างระหว่างแนวแหล่งกำเนิดแสงกับฉากเท่ากับ 1.0 เมตร

แนวคิด เขียนแผนภาพแสดงตำแหน่งต่าง ๆ และพิจารณาเช่นเดียวกับตัวอย่าง 10.2 และ 10.3



เนื่องจาก $\tan\theta = \frac{x}{L} = \frac{1.35\,\text{cm}}{100\,\text{cm}} = 0.0135$ มีค่าน้อยกว่า $\tan 10^\circ = 0.176$

จึงพิจารณาค่า n' ได้จากสมการ $d\frac{x}{L} = n'\lambda$

ถ้า n' ที่คำนวณได้เป็นจำนวนเต็มหรือมีเศษใกล้เคียงกับจำนวนเต็ม แสดงว่าเป็นแถบสว่างอันดับที่ $n = n'$ แต่ถ้า n' เป็นจำนวนที่มีเศษเป็น 0.5 หรือใกล้เคียงกับ 0.5 แสดงว่าเป็นแถบมืดอันดับที่ $n = n' + \frac{1}{2}$

วิธีทำ

จาก $$d\frac{x}{L} = n'\lambda$$

แทนค่า $d = 0.10\times10^{-3}\ \text{m}$ $x = 1.35\times10^{-2}\ \text{m}$ และ $\lambda = 540\times10^{-9}\ \text{m}$ จะได้

$$n' = \frac{dx}{\lambda L}$$
$$= \frac{\left(0.1\times10^{-3}\ \text{m}\right)\left(1.35\times10^{-2}\ \text{m}\right)}{\left(540\times10^{-9}\ \text{m}\right)\left(1.0\ \text{m}\right)}$$
$$= 2.5$$

เนื่องจาก $n = n' + \frac{1}{2} = 2.5+0.5 = 3$ นั่นคือเป็นแถบมืดอันดับที่ 3

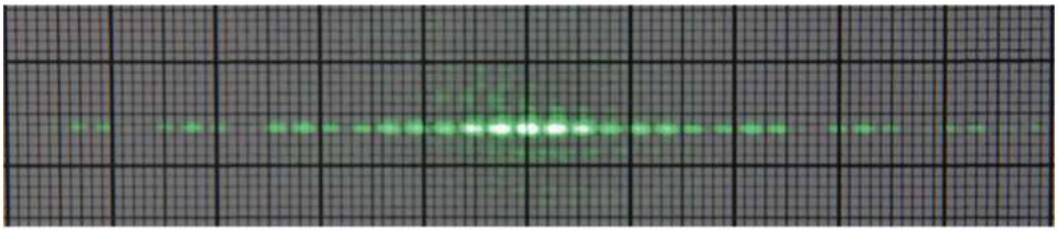
ตอบ เป็นตำแหน่งของแถบมืดอันดับที่สาม

การแทรกสอดของแสงจากสลิตคู่ข้างต้น ที่ถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุด (หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า การแทรกสอดของยัง) ลวดลายการแทรกสอดมีลักษณะดังนี้

- แถบสว่างแต่ละแถบ มีความสว่างใกล้เคียงกัน
- แถบสว่างแต่ละแถบ มีความกว้างใกล้เคียงกัน
- ระยะห่างระหว่างแถบสว่างใกล้เคียงกัน
- ระยะห่างระหว่างแถบมืดใกล้เคียงกัน

อย่างไรก็ตาม การทำการทดลองในระดับนี้โดยใช้ช่องเปิดที่มีขนาดเล็กมาก ๆ จนถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดแสงแบบจุดเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นของแสงที่ใช้นั้นทำได้ยาก อีกทั้งปริมาณแสงผ่านได้น้อยจะต้องทดลองในห้องที่มืด ช่องเปิดโดยทั่วไปจะมีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับความยาวคลื่นแสง จึงเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีขนาด เมื่อให้แสงผ่านช่องเปิดขนาดเล็ก 2 ช่องหรือที่เรียกกันทั่วไปว่า สลิตคู่ แถบสว่าง-แถบมืดที่

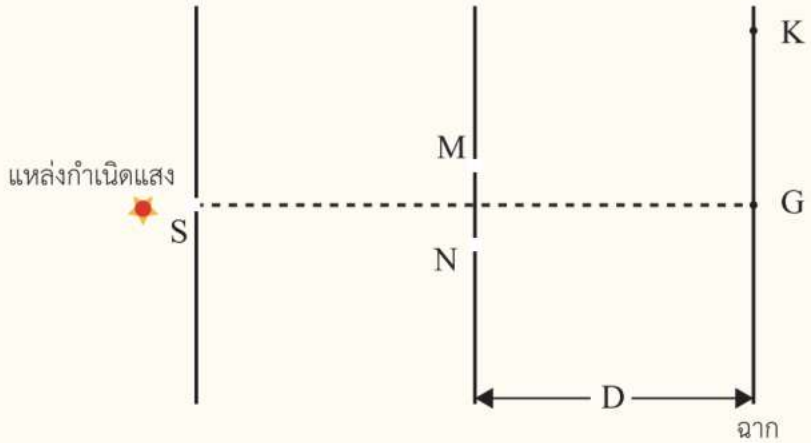
ปรากฏบนฉาก จากผลการทดลองจึงมีลักษณะเป็น แถบสว่างขนาดเท่า ๆ กัน แต่ละแถบมีความสว่างไม่เท่ากันเป็นกลุ่ม โดยกลุ่มกลางมีความสว่างมากกว่าแถบสว่างกลุ่มที่อยู่ถัดไปด้านข้าง ดังรูป 10.6 ซึ่งเป็นเพราะเหตุใดจะได้ศึกษาต่อไป



รูป 10.6 การแทรกสอดของแสงจากช่องเปิดขนาดเล็ก

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 10.2

1. การทดลองเรื่องการแทรกสอดของธอมัส ยัง เมื่อประมาณ 200 ปีมาแล้ว เป็นการสนับสนุนแนวคิดเกี่ยวกับเรื่องใด
2. ถ้ากำหนดให้ระยะทาง S_1P และ S_2P เท่ากับ 125λ และ 120λ ตามลำดับ ความต่างเฟสของคลื่นสองขบวนนี้ที่ตำแหน่ง P เป็นเท่าใด
3. รูปแสดงแผนภาพการทดลองการแทรกสอดของยัง ซึ่งมีแหล่งกำเนิดแสงส่องผ่านสลิตเดี่ยว S และผ่านสลิตคู่ M กับ N ไปตกกระทบฉากซึ่งห่างจากสลิตคู่ M และ N เป็นระยะ D ถ้าแนวแบ่งครึ่ง MN ผ่านฉากที่ตำแหน่ง G และแสงมีความยาวคลื่น λ ถ้า K เป็นจุด ๆ หนึ่งบนฉากที่ทำให้ $NK - MK = \frac{\lambda}{2}$

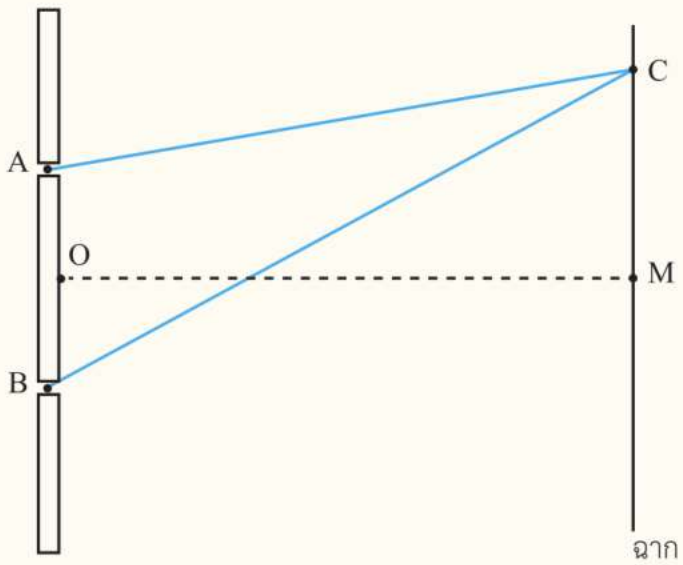


รูป ประกอบปัญหาข้อ 3

ก. ภาพที่ปรากฏบนฉากที่ตำแหน่ง G และ K เป็นอย่างไร

ข. ถ้าต้องการให้แถบสว่างอยู่ใกล้กันมากขึ้น จะต้องทำอย่างไร

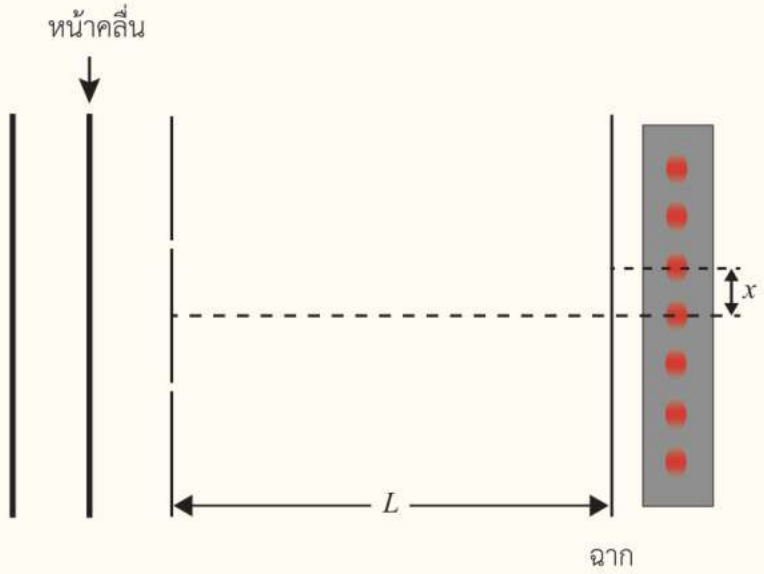
4. AB เป็นสลิตคู่ เมื่อมีแสงที่มีความยาวคลื่น λ ตกกระทบสลิตคู่ในแนวตั้งฉาก ภาพการแทรกสอดจะปรากฏที่ฉาก ถ้าระยะ $AC = n\lambda$ และ $BC = (n+3)\lambda$ เมื่อ n เป็นจำนวนเต็ม ให้ OM เป็นแนวกลาง ภาพการแทรกสอดที่ C เป็นแถบสว่างหรือแถบมืดอันดับที่เท่าใด



รูป ประกอบปัญหาข้อ 4

แบบฝึกหัด 10.2

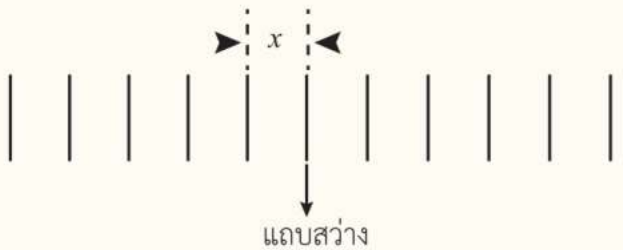
1. แสงมีความยาวคลื่น 5.9×10^{-7} เมตร ตกกระทบตั้งฉากกับแนวสลิตคู่ ถ้าสลิตทั้งสองอยู่ห่างกัน 1.0×10^{-3} เมตร ภาพการแทรกสอดบนฉากที่อยู่ห่างจากสลิตคู่เป็นระยะ L ให้ x คือ ระยะที่แถบสว่างแรกอยู่ห่างจากแถบสว่างกลาง ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 1

ถ้า L มีค่า 1 เมตร x จะมีค่าเท่าใด

2. เส้นทึบข้างล่างแทนแถบสว่างของภาพแทรกสอดที่เกิดจากแสงที่มีความยาวคลื่น 6.0×10^{-7} เมตร เมื่อตกกระทบสลิตคู่ในแนวตั้งฉาก ถ้าสลิตทั้งสองอยู่ห่างกัน 2.0×10^{-5} เมตร และฉากรับภาพอยู่ห่างจากสลิต 2.0 เมตร



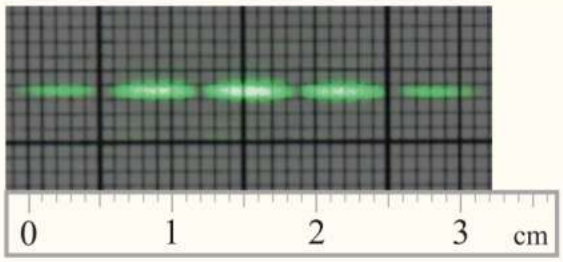
รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 2

ก. ระยะ x มีค่าเท่าใด

ข. ถ้าระยะระหว่างสลิตกับฉากเพิ่มขึ้น ระยะ x จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

ค. ถ้าทำให้แหล่งกำเนิดแสงสว่างขึ้น ระยะ x จะเปลี่ยนแปลงอย่างไร

3.



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 3

จากรูป ความกว้างของแถบสว่างกลางมีค่าเท่าใด

10.3 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

ในหัวข้อการแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่ ปรากฏแถบมืดแถบสว่างบนฉาก ถ้าฉายแสงผ่านสลิตเดี่ยว แสงที่ปรากฏบนฉากจะเป็นอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรมต่อไปนี้

กิจกรรม 10.2 การเลี้ยวเบนของแสง

จุดประสงค์

สังเกตและอธิบายรูปแบบการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างขนาดต่าง ๆ

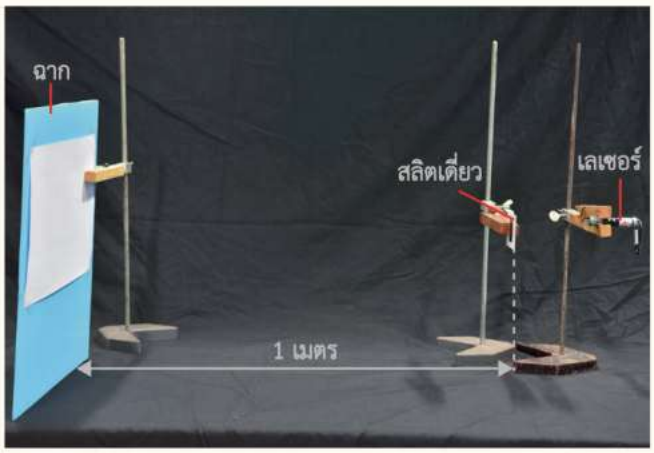
วัสดุและอุปกรณ์

1. เลเซอร์พอยเตอร์ชนิดสีแดง	1 อัน
2. สลิตเดี่ยว	1 แผ่น
3. ไม้เมตร	1 อัน
4. แท่นยึด	3 ชุด
5. ฉาก	1 แผ่น
6. อุปกรณ์บันทึกภาพ	1 เครื่อง

วิธีทำกิจกรรม

1. ยึดเลเซอร์พอยเตอร์และสลิตเดี่ยวกับแท่นยึด ดังรูป
2. จัดให้ระยะห่างระหว่างสลิตกับฉาก ห่างกันอย่างน้อย 1 เมตร
3. ฉายแสงเลเซอร์สีแดงผ่านสลิตที่มีความกว้าง 50 ไมโครเมตร สังเกตและบันทึกภาพที่ปรากฏบนฉาก

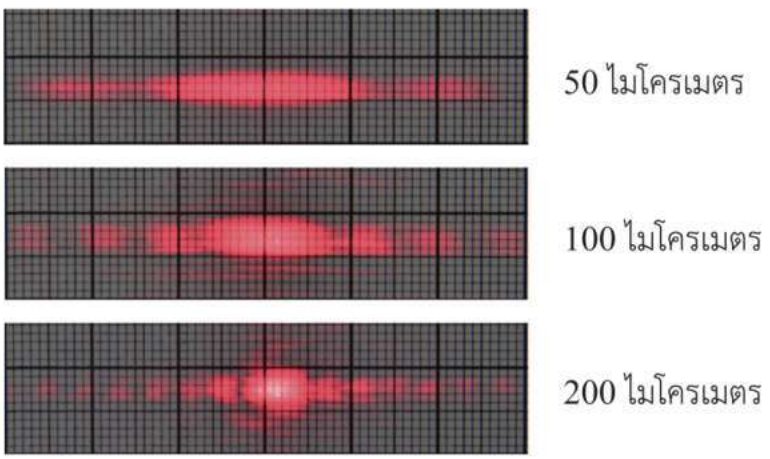
4. ทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนความกว้างของสลิตเป็น 100 และ 200 ไมโครเมตร



รูป การจัดอุปกรณ์แสดงการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ขนาดแถบสว่างที่ปรากฏบนฉากเปรียบเทียบกับขนาดของสลิตเดี่ยว เป็นอย่างไร
- ☐ ภาพบนฉากในกรณีที่ใช้สลิตเดี่ยวที่ความกว้างต่างกัน มีลักษณะอย่างไร และเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร
- ☐ แถบสว่างและแถบมืดที่ปรากฏบนฉากเหมือนหรือแตกต่างจากสลิตคู่อย่างไร



รูป 10.7 แถบสว่างและแถบมืดจากสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างขนาดต่าง ๆ

จากผลการทดลอง พบว่าแถบสว่างที่ปรากฏบนฉากมีขนาดใหญ่กว่าช่องแสดงว่าแสงมีการเลี้ยวเบนผ่านสลิตเดี่ยว ซึ่งเห็นแถบสว่างและแถบมืดบนฉากคล้ายกับกรณีการแทรกสอดของแสงจากสลิตคู่ที่ได้ศึกษามาแล้ว แต่ที่แตกต่างคือ แถบสว่างกลางมีความกว้างและมีความเข้มแสงมากกว่าแถบสว่างอื่น ๆ และยังพบว่า ความกว้างของแถบสว่างกลางเพิ่มขึ้นเมื่อความกว้างของสลิตเดี่ยวลดลง และระยะระหว่างแถบสว่างอื่น ๆ จะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

แถบสว่าง-แถบมืดที่ปรากฏบนฉากนี้เป็นผลจากการที่**แสงเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบไปแทรกสอดกัน** การเกิดแถบสว่าง-แถบมืดนี้เป็นผลจากการแทรกสอดของแสง ซึ่งจะต้องมีแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์อย่างน้อยสองแหล่งกำเนิดแสงเดินทางมาแทรกสอดกัน เงื่อนไขการเกิดแถบสว่าง แถบมืดจะเหมือนหรือแตกต่างกันกับการแทรกสอดของแสงจากสลิตคู่ จะได้ศึกษาต่อไปนี้

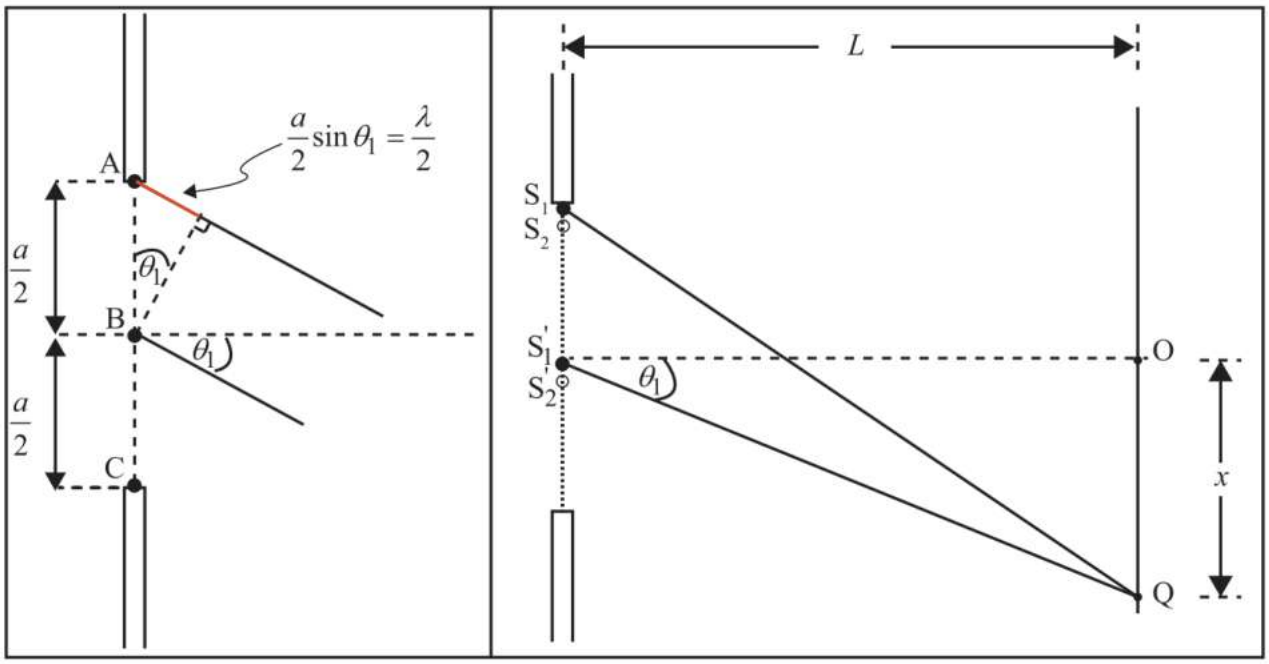
ข้อสังเกต

การเลี้ยวเบนของแสงแต่เพียงปรากฏการณ์เดียวไม่สามารถทำให้เกิดแถบสว่าง-แถบมืดบนฉากได้ แต่แสงที่เกิดการเลี้ยวเบนไปนั้นจะต้องมาแทรกสอดกันจึงจะปรากฏเป็นแถบสว่าง-แถบมืดบนฉากได้ หรือกล่าวได้ว่า การเกิดแถบสว่าง-แถบมืดบนฉากเกิดจากการแทรกสอดของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์อย่างน้อยสองแหล่งกำเนิด ในกรณีที่แสงผ่านช่องเปิด 2 ช่องแล้วเกิดแถบสว่าง-แถบมืดบนฉากนั้น เราสามารถเข้าใจได้ไม่ยากว่า ช่องเปิดแต่ละช่องเป็นเหมือนแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ที่ให้คลื่นแสงมาแทรกสอดกัน แต่การที่แสงผ่านช่องเปิดเพียงช่องเดียวแล้วปรากฏให้เห็นเป็นแถบสว่าง-แถบมืดบนฉากนั้น เกิดขึ้นได้อย่างไร ทั้ง ๆ ที่ดูเหมือนมีแหล่งกำเนิดแสงเพียงแหล่งเดียวเท่านั้น

พิจารณาแสงความยาวคลื่น λ ผ่านสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างสลิตเท่ากับ a การที่แสงสามารถเกิดการแทรกสอดบนฉากได้นั้นแสดงว่าต้องมีการซ้อนทับกันของคลื่นแสงมากกว่าหนึ่งแหล่งกำเนิด คลื่นแสงเหล่านี้มาจากแหล่งกำเนิดใด ในเมื่อมีเพียงลำแสงเดียวเท่านั้นที่ผ่านสลิตเดี่ยว

จากหลักการของฮอยเกนส์ ทุก ๆ ตำแหน่งบนหน้าคลื่นตรงช่องของสลิตทำหน้าที่เสมือนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นทรงกลมใหม่ที่แผ่หน้าคลื่นออกไป ดังนั้น การเกิดตำแหน่งมืดแสดงว่าคลื่นจากแหล่งกำเนิดจะต้องจับคู่แทรกสอดแบบหักล้างกันหมดพอดี การพิจารณาแถบมืดอันดับที่หนึ่ง จะแบ่งแหล่งกำเนิดตรงช่องของสลิตออกเป็น 2 ส่วน เท่าๆ กัน คือ AB และ BC โดย S_1 เป็นแหล่งกำเนิดบนสุดของส่วน AB และ S_1' เป็นแหล่งกำเนิดบนสุดของส่วน BC พิจารณาการหักล้างของคลื่นดังนี้ คลื่นจาก S_1 กับ S_1' หักล้างกันที่จุด Q ทำนองเดียวกันคลื่นจากแหล่งกำเนิดถัดจาก S_1 และถัดจาก S_1' เช่น S_2 กับ S_2' ก็จะไปหักล้างกันที่จุด Q เป็นเช่นนี้ไปจนครบแหล่งกำเนิดทั้ง 2 ส่วน โดยความต่างระยะทาง (Δr) จากแหล่ง

กำเนิดแสงทุกคู่ไปยังจุด Q จะเท่ากับ $\frac{\lambda}{2}$ ดังรูป 10.8



รูป 10.8 ตำแหน่งของหน้าคลื่นในสลิตเดี่ยวที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสง ตามหลักการของฮอยเกนส์เมื่อแบ่งช่องของสลิตออกเป็น 2 ส่วน

เนื่องจากระยะสลิตกับฉากไกลมาก เมื่อเทียบกับความกว้างของช่อง อาจประมาณได้ว่าแสงจากช่องไปกระทบฉากที่ตำแหน่ง Q เกือบเป็นรังสีขนานเนื่องจากจุด Q เป็นตำแหน่งมืดอันดับที่หนึ่ง ดังนั้น

$$|S_1Q - S_1'Q| = \frac{\lambda}{2}$$

$$\frac{a}{2}\sin\theta_1 = \frac{\lambda}{2}$$

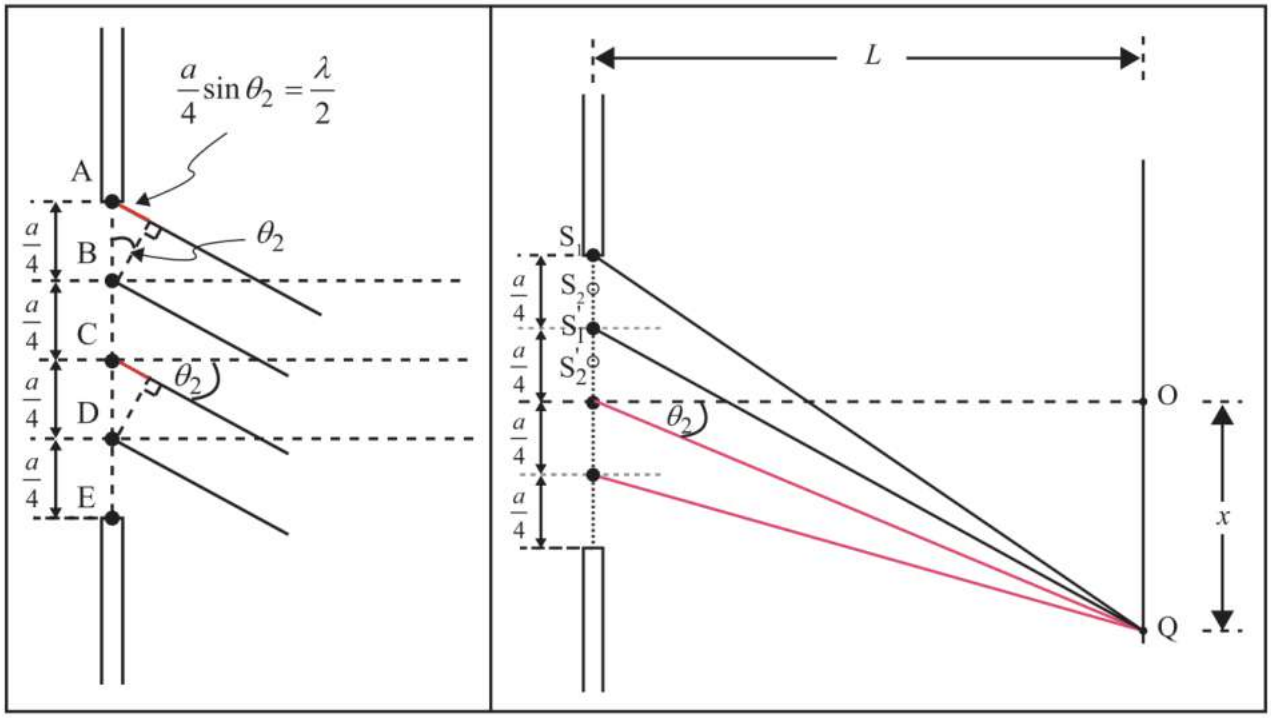
$$a\sin\theta_1 = \lambda$$

โดยที่ a คือ ความกว้างของสลิตเดี่ยว

λ คือ ความยาวคลื่นแสง และ

θ_1 คือ มุมของตำแหน่งที่เกิดแถบมืดอันดับที่หนึ่งบนฉาก เทียบกับเส้นแนวกลางระหว่างสลิตกับฉาก ซึ่งจะเกิดขึ้นทั้งสองด้านของเส้นแนวกลาง

พิจารณาในทำนองเดียวกัน การหาแถบมืดอันดับที่ 2 หรือ 3 จะแบ่งแหล่งกำเนิดออกเป็น 4 ส่วน หรือ 6 ส่วน เท่า ๆ กันตามลำดับ โดยจับคู่แหล่งกำเนิดที่ส่งคลื่นไปหักล้างกัน ของสองส่วนที่อยู่ถัดกัน



รูป 10.9 ตำแหน่งของหน้าคลื่นในสลิตเดี่ยวเมื่อแบ่งช่องสลิตออกเป็น 4 ส่วน

ถ้าจุด Q เป็นแถบมืดอันดับที่ 2 จะแบ่งช่องออกเป็น 4 ส่วนเท่า ๆ กัน โดยแหล่งกำเนิดคลื่นในช่วง AB จับคู่หักล้างกับแหล่งกำเนิดในช่วง BC และช่วง CD หักล้างกับช่วง DE จะได้

$$\frac{a}{4}\sin\theta_2 = \frac{\lambda}{2}$$

หรือ

$$a\sin\theta_2 = 2\lambda$$

โดยที่ θ_2 คือ มุมของตำแหน่งที่เกิดแถบมืดอันดับที่สองบนฉาก ทำมุมกับเส้นแนวกลาง

ในการพิจารณาตำแหน่งของแถบมืดอันดับอื่น ๆ ก็สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกันนี้โดยแบ่งสลิตเดี่ยวออกเป็นส่วน ๆ ที่เป็นเลขคู่ ดังนั้น จะได้ความสัมพันธ์แถบมืดอันดับต่าง ๆ ดังนี้

$$a\sin\theta_n = n\lambda \qquad n = 1, 2, \ldots \qquad (10.7)$$

โดยที่ a คือ ความกว้างของสลิตเดี่ยว

λ คือ ความยาวคลื่นแสง และ

θ_n คือ มุมของตำแหน่งที่เกิดแถบมืดอันดับที่ n บนฉาก

อาจหาตำแหน่งของแถบมืดอันดับที่ n บนฉากเทียบกับแนวสว่างกลาง โดยระยะระหว่างตำแหน่งที่พิจารณากับแนวสว่างกลาง (x) มีค่าน้อยกว่าระยะห่างระหว่างช่องของสลิตกับฉาก (L) มากๆ ซึ่งอาจประมาณได้ว่า θ เป็นมุมเล็ก ๆ $(\theta < 10^o)$ โดย

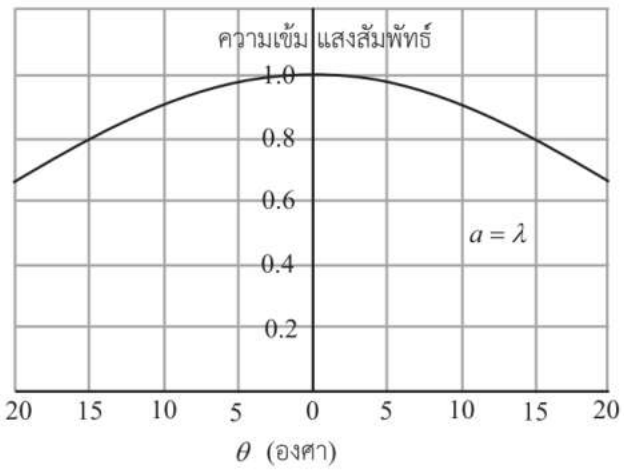
$$\sin\theta \approx \tan\theta = \frac{x}{L}$$

สมการ (10.7) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

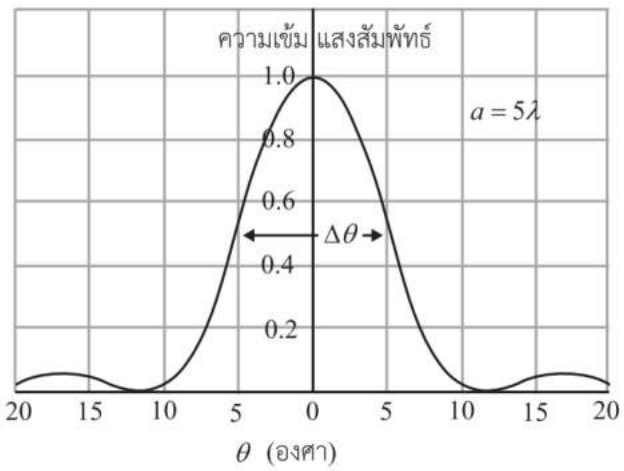
แถบมืดอันดับที่ n

$$a\frac{x}{L} = n\lambda \qquad n = 1, 2, \ldots \qquad (10.8)$$

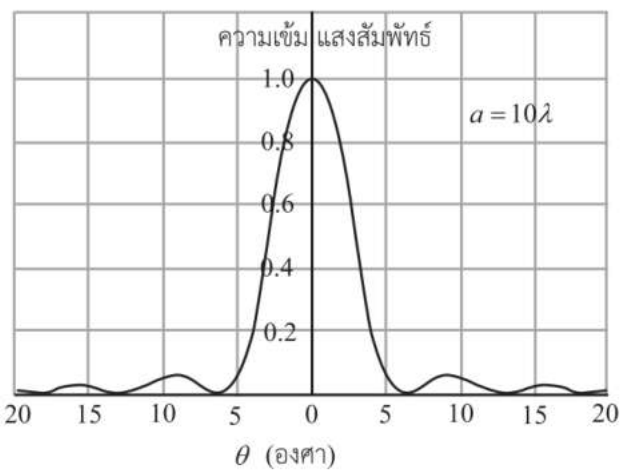
จากสมการ (10.7) ถ้าต้องการให้ได้แถบสว่างกลางที่ปรากฏบนฉากมีความกว้างมาก ๆ หรือ θ_1 มีค่ามาก ๆ นั่นคือค่า $\sin\theta_1$ จะมีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน ซึ่งค่าไซน์ของมุมจะมีค่ามากที่สุดคือ 1 เมื่อมุม $\theta = 90^o$ นั่นคือ จะปรากฏเฉพาะแถบสว่างกลางบนฉากเท่านั้นเมื่อความกว้างของสลิตเดี่ยวมีค่าเท่ากับความยาวคลื่นแสงที่ใช้ ดังรูป 10.10 ก. แต่ถ้าเราใช้สลิตเดี่ยวที่มีความกว้างมากกว่าความยาวคลื่นแสง ความกว้างของแถบสว่างกลางที่ปรากฏบนฉากก็จะแคบลงและปรากฏแถบสว่างอื่นเพิ่มขึ้น ดังรูป 10.10 ข. และ 10.10 ค.



ก.



ข.



ค.

รูป 10.10 กราฟแสดงความเข้มแสงของแถบสว่างที่ปรากฏบนฉาก
เมื่อใช้สลิตเดี่ยวที่มีความกว้างต่าง ๆ เทียบกับความยาวคลื่นแสงที่ใช้

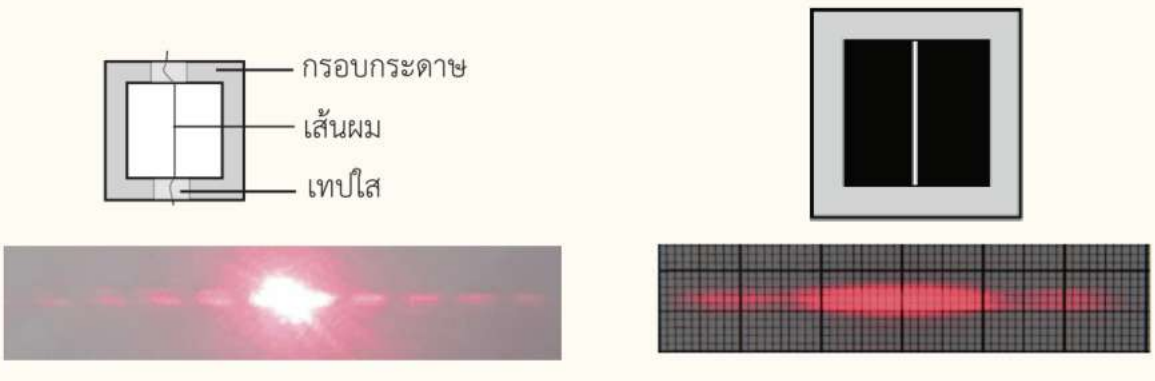
เมื่อฉายแสงผ่านช่องเปิดขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นมากๆ จึงเห็นเป็นเพียงจุดสว่างบนฉาก เนื่องจากแสงเลี้ยวเบนน้อยมากเมื่อผ่านช่องเปิดขนาดใหญ่ ระยะห่างของแถบมืดอันดับที่หนึ่งทั้งสองข้างของแถบสว่างกลางจะแคบลง จนเห็นเป็นจุดสว่างบนฉากเท่ากับขนาดช่องเปิด

ดังนั้น การเกิดแถบสว่าง-แถบมืดเมื่อแสงเดินทางผ่านช่องเปิดหนึ่งช่องหรือสลิตเดี่ยวแสดงให้เห็นว่ามีการแทรกสอดเกิดขึ้น และแหล่งกำเนิดของแสงที่มาแทรกสอดกันนั้นก็คือแสงที่เลี้ยวเบนผ่านสลิตเดี่ยวมานั่นเอง

รู้หรือไม่

การวัดขนาดวัตถุที่มีขนาดเล็กมาก เช่น เส้นผม นั้น ไม่สามารถใช้เครื่องมือวัด เช่น ไม้บรรทัด เวอร์เนียร์ วัดขนาดวัตถุได้โดยตรงเนื่องจากขนาดของวัตถุมีขนาดเล็กกว่าสเกลที่ละเอียดที่สุดของเครื่องมือวัด ซึ่งเราสามารถประยุกต์ใช้ความรู้เรื่องการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสงที่ผ่านสลิตเดี่ยวมาหาขนาดของเส้นผมได้

เมื่อนำแสงเลเซอร์ที่ทราบค่าความยาวคลื่นฉายผ่านเส้นผม จะทำให้เกิดลวดลายการแทรกสอดโดยแถบสว่างกลางจะมีความกว้างมากกว่าแถบสว่างอื่น ๆ ประมาณ 2 เท่า ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับลวดลายการแทรกสอดของแสงซึ่งผ่านสลิตเดี่ยว ดังรูป



ก. ข.

รูป ลวดลายการแทรกสอดจาก ก. เส้นผม ข. สลิตเดี่ยว

การหาขนาดเส้นผมสามารถคำนวณได้จากสมการ (10.8)

$$a\frac{x}{L} = n\lambda$$

โดย a คือขนาดของเส้นผม

ชวนคิด

เพราะเหตุใดการเลี้ยวเบนของแสงจึงพบเห็นได้ยาก แต่การเลี้ยวเบนของคลื่นน้ำจึงพบได้ทั่วไป

ตัวอย่าง 10.5 ฉายแสงความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร ผ่านสลิตเดี่ยวที่มีช่องกว้าง 1.18 ไมโครเมตร
ก. จงหามุมที่แถบมืดอันดับที่หนึ่งทำกับเส้นแนวกลาง
ข. เขียนกราฟความเข้มแสงสัมพัทธ์ของแถบสว่างกลางกับมุมที่เบน

ก. แนวคิด การแทรกสอดของแสงผ่านช่องเดี่ยวเป็นไปตามสมการ

$$a\sin\theta_n = n\lambda$$

วิธีทำ จากความสัมพันธ์ตำแหน่งแถบมืดจากสลิตเดี่ยว

$$a\sin\theta_n = n\lambda$$

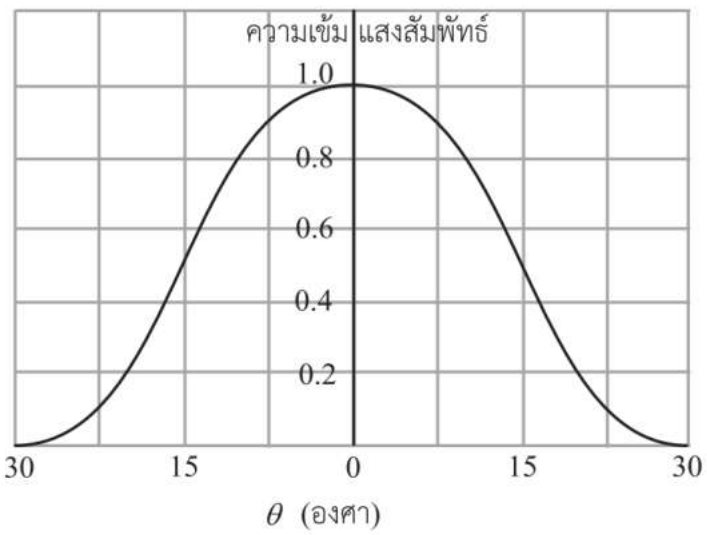
แทนค่า $a = 1.18 \times 10^{-6}\ \text{m}$ $\lambda = 589 \times 10^{-9}\ \text{m}$ และ $n = 1$ จะได้

$$\sin\theta_1 = \frac{(1)589\times10^{-9}\ \text{m}}{(1.18\times10^{-6}\ \text{m})}$$
$$= 0.499$$

$$\theta_1 = 30^\circ$$

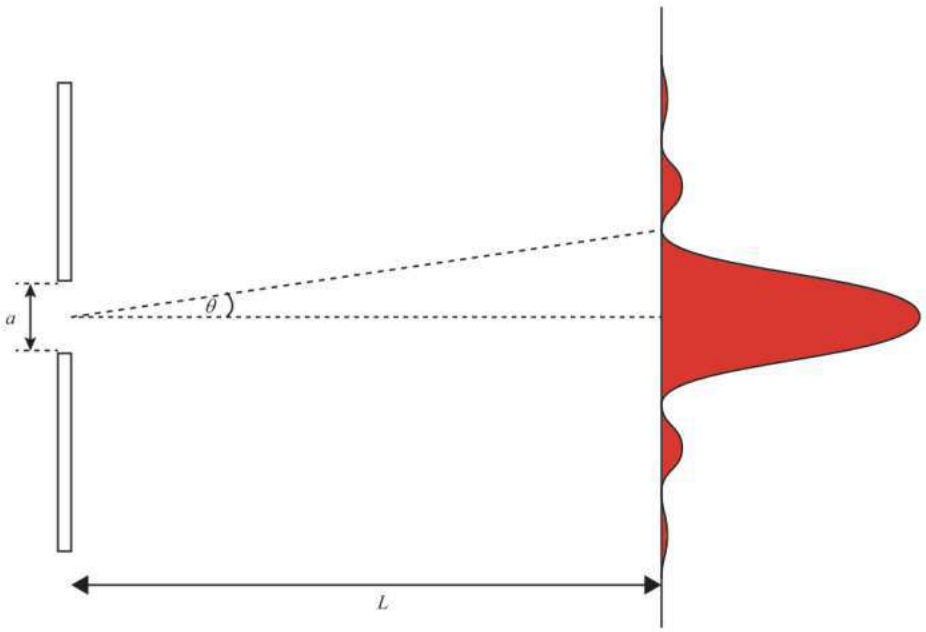
ตอบ มุมที่แถบมืดอันดับที่หนึ่งทำกับเส้นแนวกลางเท่ากับ 30 องศา

ข. แนวคิด พิจารณาการเขียนกราฟตามรูป 10.10



ตัวอย่าง 10.6 ฉายแสงความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร ผ่านสลิตเดี่ยวที่มีช่องกว้าง 1.00 มิลลิเมตร ปรากฏแถบสว่าง-แถบมืดบนฉากที่อยู่ห่างออกไป 3.00 เมตร จงหาความกว้างของแถบสว่างกลาง

แนวคิด เขียนแผนภาพการแทรกสอด และหาความกว้างของแถบสว่างกลางจากระยะห่างระหว่างตำแหน่งของแถบมืดอันดับที่หนึ่งที่อยู่สองข้างของแถบสว่างกลาง



วิธีทำ จากความสัมพันธ์ตำแหน่งแถบมืดจากสลิตเดี่ยว

$$a\sin\theta_n = n\lambda$$

แทนค่า $\lambda = 589 \times 10^{-9}\,\text{m}$ และ $n = 1$ จะได้

$$\sin\theta_1 = \frac{(1)589\times10^{-9}\ \text{m}}{(1.00\times10^{-3}\ \text{m})}$$

$$\theta_1 = 0.034^\circ$$

เนื่องจากมุมของแถบมืดอันดับที่หนึ่งมีค่าน้อยมาก เราสามารถใช้การประมาณมุมเล็ก ๆ และใช้สมการ (10.8) เพื่อหาตำแหน่งของแถบมืดบนฉากได้

$$a\frac{x}{L} = n\lambda$$

แทนค่า λ L a และ $n = 1$ จะได้

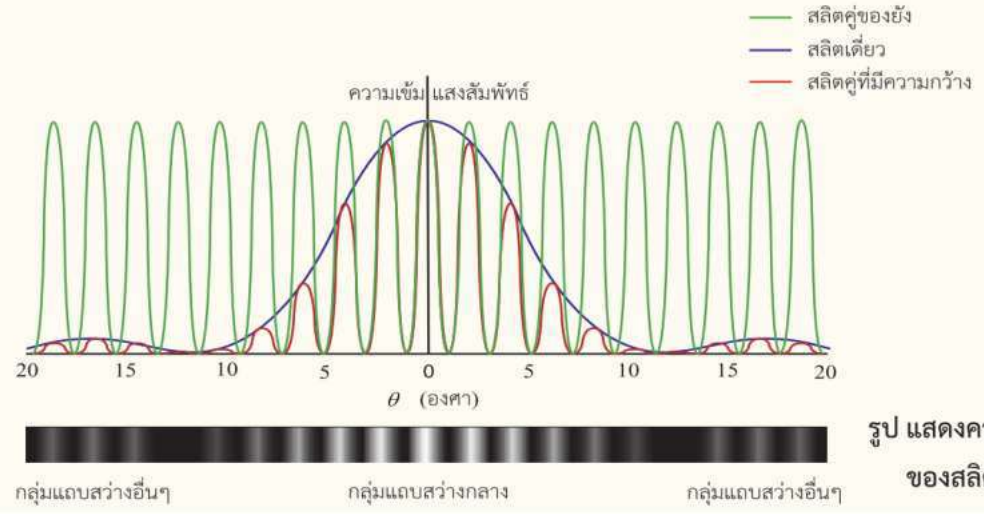
$$x = \frac{n\lambda L}{a}$$
$$= \frac{(1)(589\times10^{-9}\,\text{m})(3.00\,\text{m})}{(1.00\times10^{-3}\,\text{m})}$$
$$= 1.767\times10^{-3}\,\text{m}$$

แถบมืดอันดับที่หนึ่งอยู่ห่างจากเส้นแนวกลาง 1.767 มิลลิเมตร ดังนั้น ความกว้างของแถบสว่างกลางเท่ากับ $2 \times 1.767\ \text{mm} = 3.534\ \text{mm}$

ตอบ ความกว้างของแถบสว่างกลางเท่ากับ 3.53 มิลลิเมตร

ความรู้เพิ่มเติม

หากทำการทดลองฉายแสงเลเซอร์ผ่านสลิตคู่ที่มีความกว้างของช่องมากกว่ากรณีของยัง จะพบว่าลวดลายการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากแตกต่างจากการแทรกสอดของยังที่ได้ศึกษาผ่านมา คือ เกิดเป็นกลุ่มแถบสว่างกลางที่มีความกว้างกว่ากลุ่มแถบสว่างถัดไป ลวดลายการแทรกสอดเมื่อให้แสงผ่านสลิตคู่ที่มีความกว้าง จะมีลักษณะบางอย่างคล้ายผลการเลี้ยวเบนผ่านสลิตเดี่ยว กล่าวคือ มีกลุ่มแถบสว่างกลางที่มีความเข้มและความกว้างมากกว่ากลุ่มแถบสว่างอื่น ๆ แต่ก็มีลักษณะที่ต่างจากสลิตเดี่ยว โดยคล้ายกับการแทรกสอดของยังคือ มีแถบสว่างเล็ก ๆ ที่มีระยะห่างเท่า ๆ กัน ซ้อนอยู่ภายในแถบสว่างที่เกิดจากสลิตเดี่ยวดังรูป อาจกล่าวได้ว่า ลวดลายการแทรกสอดที่ปรากฏนั้นเป็นผลรวมจากการแทรกสอดของยังกับการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยวแต่ละช่อง เกิดเป็น **กรอบ** (envelope) ของกลุ่มแถบสว่างความเข้มสูง โดยมีแถบสว่างเล็ก ๆ ในกลุ่มแถบสว่างความเข้มสูงเกิดจากการแทรกสอดของแสงจากสลิตเดี่ยวทั้งสองช่องนั่นเอง



รูป แสดงความเข้มแสงสัมพัทธ์ของสลิตคู่ที่มีความกว้าง

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 10.3

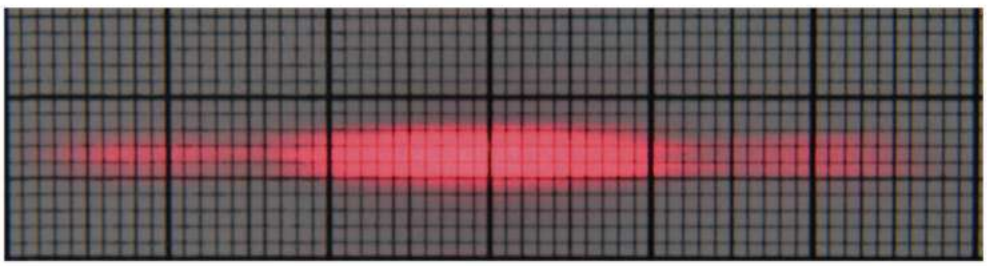
1. ในการทดลองเพื่อหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์โดยใช้เลเซอร์ฉายผ่านสลิตเดี่ยวที่ทราบความกว้างของช่อง แสงเลเซอร์จะเลี้ยวเบนที่สลิต แล้วไปแทรกสอดบนฉาก พบว่า จุดสว่างที่เกิดขึ้นอยู่ชิดกันมากทำให้การวัดระยะห่างมีความคลาดเคลื่อนมาก ความยาวคลื่นของเลเซอร์ที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนสูง จะทำอย่างไรให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากขึ้น

แบบฝึกหัด 10.3

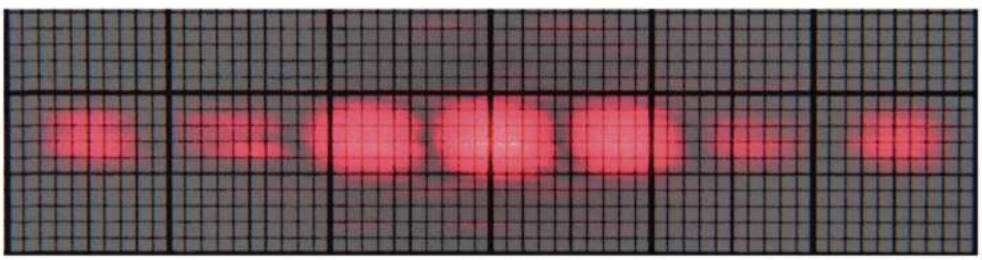
1. แสงมีความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ตกกระทบสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างของช่อง 150 ไมโครเมตร ในแนวตั้งฉากภาพการเลี้ยวเบนจะปรากฏบนฉากที่อยู่ห่างออกไป 1.30 เมตร
   ก. ขนาดของมุมที่แถบมืดอันดับที่ 1 เบนจากเส้นแนวกลาง
   ข. แถบสว่างกลางกว้างเท่าใด
2. ฉายแสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตกกระทบตั้งฉากกับแผ่นสลิตเดี่ยวที่กว้าง 0.3 มิลลิเมตร ซึ่งอยู่ห่างจากฉาก 2.0 เมตร ตำแหน่งมืดที่ 2 อยู่ห่างจากเส้นแนวกลางเป็นระยะเท่าใดในหน่วยมิลลิเมตร

10.4 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านเกรตติง

เราได้เห็นลักษณะลวดลายการแทรกสอดที่เกิดจากการเลี้ยวเบนผ่านสลิตเดี่ยวและสลิตคู่มาแล้ว พบว่าลวดลายการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากเป็นดังรูป 10.11



ก. สลิตเดี่ยว



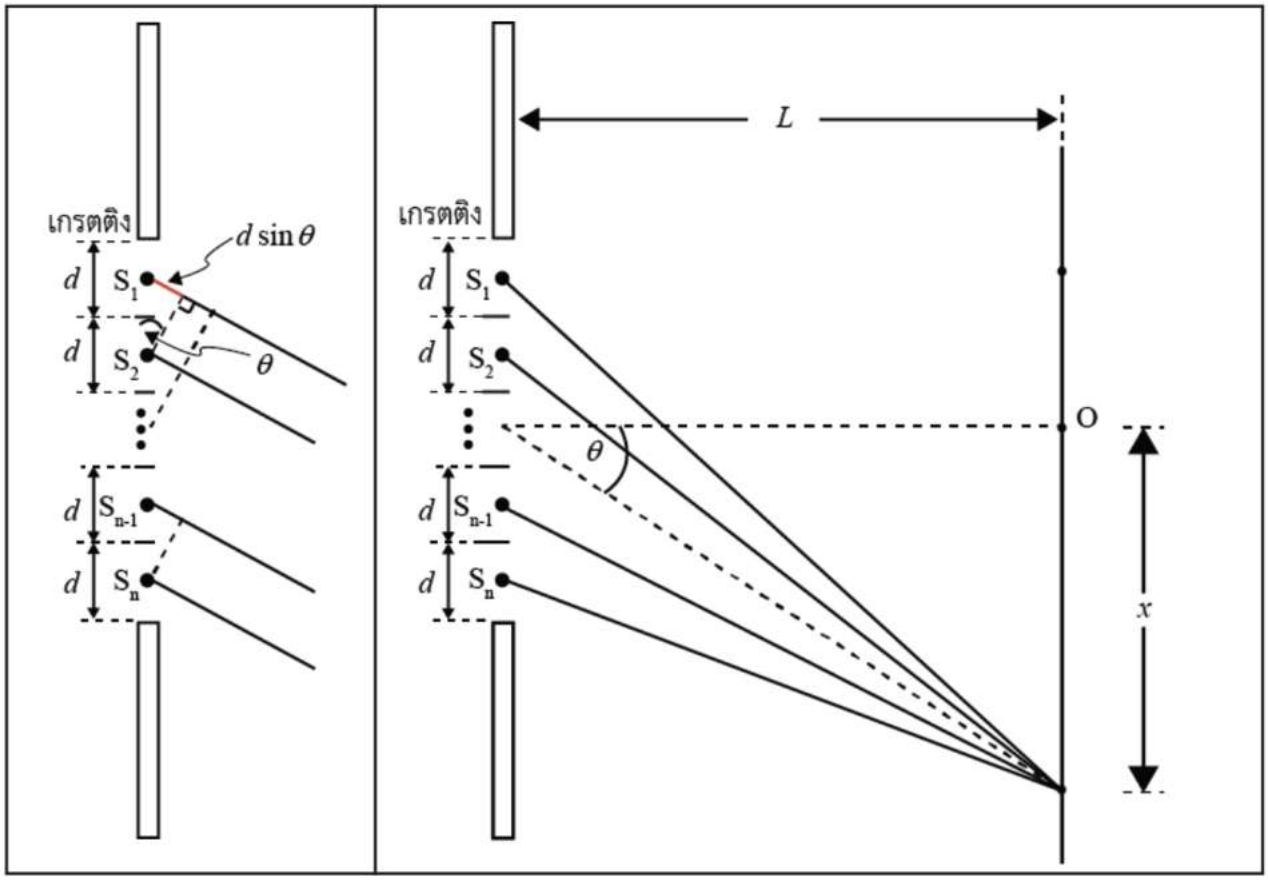
ข. สลิตคู่

รูป 10.11 ลวดลายการแทรกสอดของแสงผ่านสลิต

ถ้าเพิ่มจำนวนช่องสลิตให้มีจำนวนช่องมากขึ้น แสงที่เลี้ยวเบนผ่านช่องปรากฏบนฉาก เหมือนหรือแตกต่างจากสลิตเดี่ยวหรือสลิตคู่อย่างไร อุปกรณ์ทางแสงที่มีช่องเล็ก ๆ หลาย ๆ ช่องและระยะห่างแต่ละช่องเท่ากัน เรียกว่า **เกรตติง** (grating) โดยบางครั้งใช้คำว่าเส้นแทนช่อง ระยะห่างระหว่างช่อง (d) หาได้จาก

$$d = \frac{\text{ความกว้างของเกรตติง}}{\text{จำนวนเส้นของเกรตติง}}$$

พิจารณาแสงจากเกรตติงเป็นแสงขนานเช่นเดียวกับกรณีสลิตเดี่ยว ดังรูป



รูป 10.12 แสดงความต่างระยะทางของแหล่งกำเนิดแสงคู่หนึ่ง

เนื่องจากเราพิจารณาแถบสว่างซึ่งเกิดจากการแทรกสอดแบบเสริมทำนองเดียวกับสลิตคู่ ดังนั้น ความต่างระยะทางของแสงจากแหล่งกำเนิด (ช่อง) แต่ละคู่ที่อยู่ถัดกันจึงเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น ตำแหน่งของแถบสว่างอันดับต่าง ๆ จึงหาได้จากความสัมพันธ์

$$d\sin\theta_n = n\lambda \qquad n = 0, 1, 2, \ldots \qquad (10.9)$$

โดย d คือ ระยะห่างระหว่างช่องในเกรตติง

จะสังเกตเห็นว่า สมการของแถบสว่างสำหรับเกรตติงมีรูปสมการเช่นเดียวกับในกรณีของการแทรกสอดของยัง

จากสมการ $d\sin\theta = n\lambda$ จะเห็นได้ว่าถ้าให้แสงที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ กันผ่านเกรตติง แถบสว่างของแสงแต่ละความยาวคลื่นจะเกิด ณ ตำแหน่งต่างกัน (θ ต่างกัน) ดังนั้นถ้าให้แสงขาวผ่านเกรตติง จะพบว่าแถบสว่างของแสงสีต่าง ๆ ในแสงขาว จะเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างกัน การหาความยาวคลื่นของแสงแต่ละสี ศึกษาได้จากกิจกรรม 10.3

กิจกรรม 10.3 การทดลองหาความยาวคลื่นของแสง

จุดประสงค์

1. หาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์พอยเตอร์สีแดงโดยใช้เกรตติง
2. หาความยาวคลื่นของแสงสีต่าง ๆ โดยใช้เกรตติง

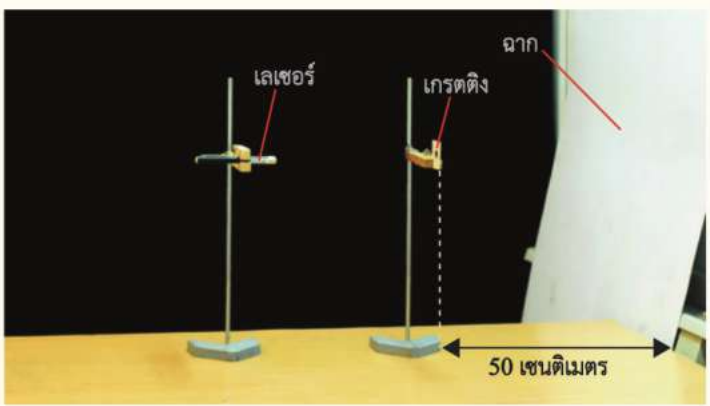
วัสดุและอุปกรณ์

1. กล่องแสง	1 กล่อง
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำ	1 เครื่อง
3. เกรตติง	1 แผ่น
4. ไม้เมตร	1 อัน
5. เลเซอร์พอยเตอร์	1 อัน
6. กระดาษเทาขาว	1 แผ่น
7. แท่นยึด	2 ชุด

วิธีทำกิจกรรม

ตอนที่ 1 การหาความยาวคลื่นแสงของเลเซอร์

1. ใช้แผ่นกระดาษเทาขาวด้านสีขาวที่กว้างประมาณ 1 เมตร วางตั้งในแนวดิ่งเป็นฉากรับแสง ยึดแผ่นเกรตติงในแนวดิ่งบนโต๊ะและให้อยู่ห่างจากฉาก (L) ประมาณ 50 เซนติเมตร
2. ฉายแสงจากเลเซอร์พอยเตอร์ผ่านเกรตติง จะปรากฏลวดลายการแทรกสอด ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนฉาก

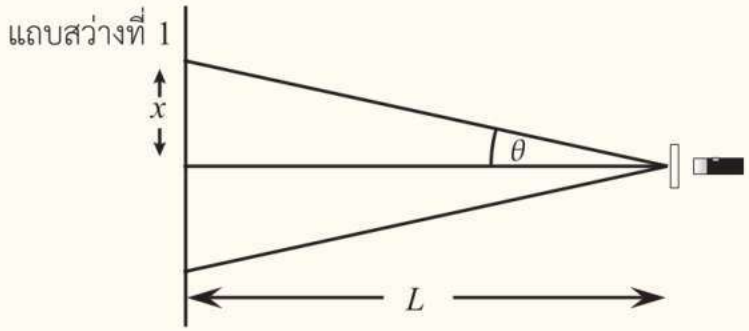


รูป การจัดอุปกรณ์เพื่อวัดความยาวคลื่นแสงเลเซอร์

3. วัดระยะห่างระหว่างแถบสว่างที่ 1 กับแถบสว่างกลาง โดยวัดระยะห่างทั้งสองข้างของแถบสว่างที่ 1 (เพื่อหาระยะห่างเฉลี่ย) บันทึกผล

4. คำนวณหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ โดยใช้ความสัมพันธ์ $d\sin\theta = \lambda \quad (n = 1)$

โดย $\sin\theta = \dfrac{x}{\sqrt{L^2 + x^2}}$ และบันทึกผล



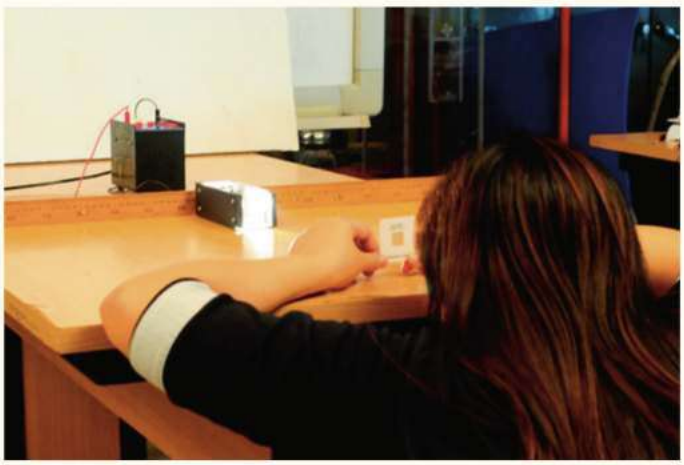
รูป แสดงรังสีของแสงผ่านเกรตติง

คำถามท้ายกิจกรรมตอนที่ 1

☐ แสงที่ใช้ในการทดลองมีความยาวคลื่นเท่าใด

ตอนที่ 2 การหาความยาวคลื่นแสงของแสงสีต่าง ๆ

1. ต่อกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงโวลต์ต่ำ โดยใช้ความต่างศักย์ 10 - 12 โวลต์
2. วางไม้เมตรด้านหลังกล่องแสงในแนวตั้งฉากกับความยาวของกล่องแสง โดยให้ขีด 50.0 เซนติเมตร อยู่ตรงกับไส้หลอดพอดี
3. มองไส้หลอดไฟฟ้าผ่านเกรตติง โดยให้เกรตติงอยู่ห่างจากไส้หลอด (L) ประมาณ 1.0 เมตร ดังรูป

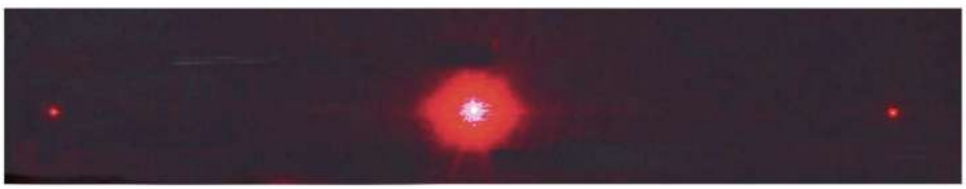


รูป การจัดอุปกรณ์เพื่อหาความยาวคลื่นของแสง

4. อ่านและบันทึกตำแหน่งบนไม้เมตรของแสงแต่ละสีที่ปรากฏทั้งสองข้าง หาระยะห่างจากแนวกลางของแสงสีต่าง ๆ ในแถบสว่างอันดับที่ 1 และนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นระยะห่าง x ของแต่ละสี บันทึกผล
5. คำนวณหาความยาวคลื่นของแสงสีต่าง ๆ โดยใช้ความสัมพันธ์ $d\sin\theta = \lambda$ โดย $\sin\theta = \frac{x}{\sqrt{L^2 + x^2}}$ และบันทึกผล

คำถามท้ายกิจกรรมตอนที่ 2

- ☐ แสงสีใดมีการเบนจากเส้นแนวกลางมากที่สุด และน้อยที่สุด
- ☐ ความยาวคลื่นของแสงแต่ละสีมีค่าเท่าใด



ก.

ข.

รูป 10.13 ภาพแสงการแทรกสอดของ ก. แสงของเลเซอร์ ข. แสงขาวผ่านเกรตติง

จากกิจกรรมตอนที่ 1 เมื่อให้แสงเลเซอร์ซึ่งเป็นแสงความถี่เดียวผ่านเกรตติง จะเห็นเป็นจุดสว่าง 2 จุดเล็ก ๆ ด้านซ้ายและขวาของจุดสว่างกลางดังรูป 10.13 ก. สามารถคำนวณหาความยาวคลื่นได้จากสมการ (10.9)

จากกิจกรรมตอนที่ 2 พบว่าเมื่อแสงขาวผ่านเกรตติง แสงที่เบนจากแนวกลางมากที่สุดคือแสงสีแดง และแสงที่เบนจากแนวกลางน้อยที่สุดคือแสงสีม่วงดังรูป 10.13 ข. ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (10.9) โดยแสงสีต่าง ๆ มีความยาวคลื่นดังแสดงในตาราง 10.1

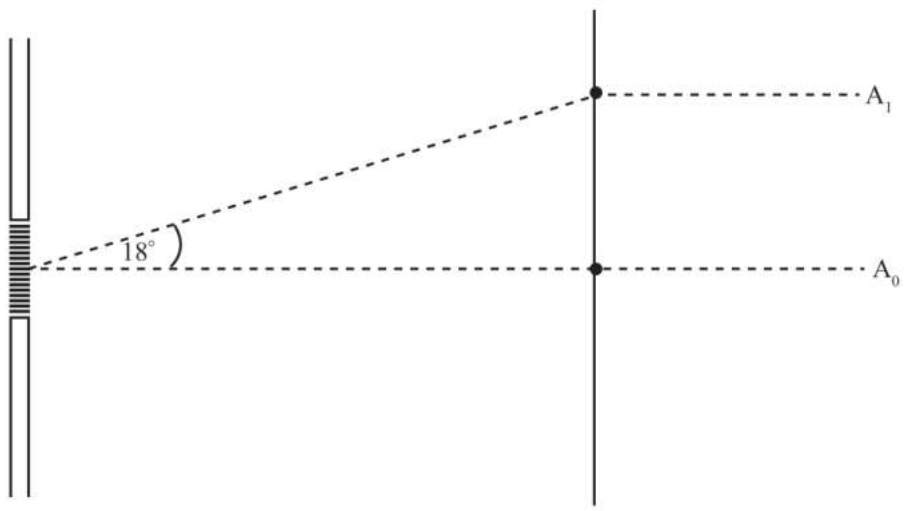
ตาราง 10.1 ความยาวคลื่นของแสงสีต่าง ๆ λ (nm)

แสงสี	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
ม่วง	390 – 425
น้ำเงิน	425 – 500
เขียว	500 – 575
เหลือง	575 – 585
แสด	585 – 620
แดง	620 – 740

(อ้างอิงจาก A Dictionary of Science. Oxford University Press, 2000.)

ตัวอย่าง 10.7 เกรตติงอันหนึ่งมีจำนวนช่อง 500 เส้น/มิลลิเมตร เมื่อใช้ทดลองเพื่อหาความยาวคลื่นของแสงสีหนึ่ง พบว่าแถบสว่างอันดับที่หนึ่งทั้งสองข้างของแถบสว่างกลางทำมุม 18° เทียบกับเส้นแนวกลาง จงหาว่าความยาวคลื่นของแสงนี้เป็นกี่นาโนเมตร

แนวคิด เขียนแผนภาพแสดงตำแหน่งของแถบสว่างอันดับที่หนึ่ง



รูป แผนภาพแสดงตำแหน่งของแถบสว่างอันดับที่หนึ่ง

วิธีทำ หาระยะห่างระหว่างช่องจาก

$$d = \frac{1\text{ mm}}{500}$$
$$= 2.00 \times 10^{-6}\text{ m}$$

หาความยาวคลื่นแสงจากความสัมพันธ์ของตำแหน่งแถบสว่างจาก

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

จะได้

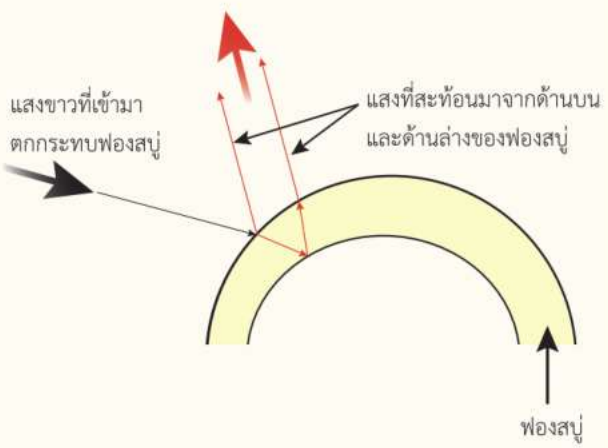
$$\lambda = \frac{d\sin\theta_1}{1}$$
$$= (2.00 \times 10^{-6}\text{ m})\sin 18^\circ$$
$$= (2.00 \times 10^{-6}\text{ m})(0.3090)$$
$$= 6.18 \times 10^{-7}\text{ m}$$
$$= 618$$

ตอบ ความยาวคลื่นของแสงที่ใช้เท่ากับ 618 นาโนเมตร

รู้หรือไม่

การเกิดสีบนฟองสบู่

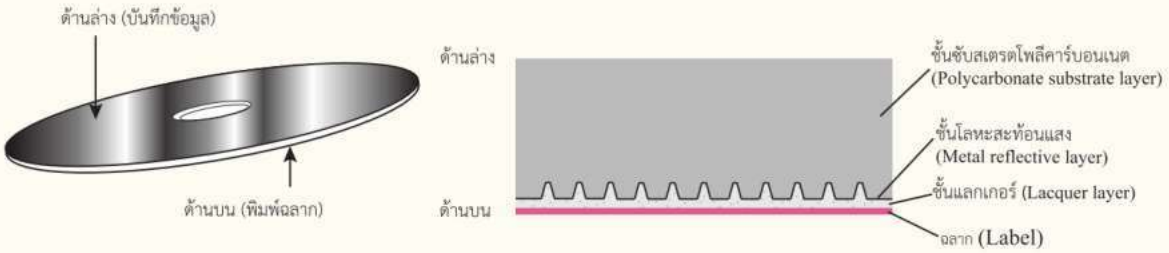
การเกิดสีสันสวยงามบนฟองสบู่เกิดจากปรากฏการณ์แทรกสอดของแสง โดยฟองสบู่มีลักษณะเป็นฟิลม์บาง (thin film) ดังรูป เมื่อแสงกระทบฟองสบู่ แสงบางส่วนจะสะท้อนที่ผิวด้านนอก และบางส่วนจะหักเหผ่านเข้าไปในฟองสบู่แล้วสะท้อนที่ผิวด้านในและเคลื่อนที่ผ่านผิวด้านนอกออกมา ทำให้เกิดความต่างระยะทางของแสงที่สะท้อนที่ผิวด้านนอกและแสงที่สะท้อนที่ผิวด้านในฟองสบู่ โดยความหนาของฟองสบู่ทำให้เกิดความต่างเฟส เกิดการแทรกสอดแบบเสริมกันและหักล้างกันของแสงสีต่าง ๆ โดยฟองสบู่ในตำแหน่งต่าง ๆ กัน



รูป แผนภาพแสดงรังสีของแสงเมื่อตกกระทบฟองสบู่

การเกิดสีรุ้งบนแผ่นซีดี (CD-ROM)

การเกิดสีต่าง ๆ บนแผ่นซีดี มีหลักการคล้ายคลึงกับการเกิดสีของแสงที่เลี้ยวเบนผ่านเกรตติง เนื่องจากผิวของแผ่นซีดีมีลักษณะเป็นร่องเล็ก ๆ จำนวนมาก เมื่อแสงกระทบร่องเล็ก ๆ เหล่านี้ที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะสะท้อนแสงเกิดความต่างระยะทางค่าต่าง ๆ ทำให้เกิดการแทรกสอดแบบเสริมของแสงสีต่าง ๆ บนแผ่นซีดีที่ตำแหน่งต่าง ๆ และเกิดสีต่าง ๆ เช่นเดียวกับเกรตติง



รูป โครงสร้างของแผ่นซีดี (CD-ROM)

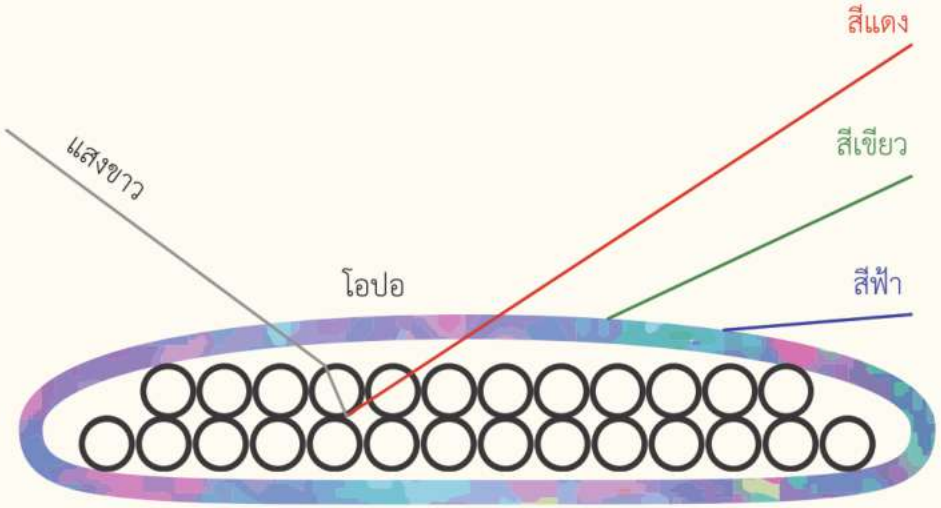
ความรู้เพิ่มเติม

อัญมณีที่เรียกว่า โอปอ (opal) ซึ่งเชื่อว่าเป็น “หินนำโชค” พบมากในประเทศออสเตรเลีย มีสีหลายสีสวยงาม

รูป โอปอ

การที่เรามองเห็นโอปอมีสีสันสวยงามหรือที่เรียกกันว่า “ปรากฏการณ์เล่นแสง” เช่นนี้ เป็นผลจากการเลี้ยวเบนของแสงจากชั้นซิลิกาที่เป็นองค์ประกอบในโอปอ แต่ละผลึกมีขนาด 150 – 350 นาโนเมตร ระหว่างผลึกของซิลิกาที่เรียงติดกันจะมีน้ำอยู่ระหว่างผลึก ทำหน้าที่เหมือนเป็นเกรตติงเลี้ยวเบน เมื่อแสงขาวผ่านเข้าไปจะเกิดการหักเหและสะท้อนไปมาในชั้นผลึก แสงความยาวคลื่นต่างกัน

จะเกิดการหักเหด้วยมุมที่ต่างกัน ทำให้เกิดการกระจายแสงในลักษณะเดียวกับปริซึม แสงแต่ละความยาวคลื่นเกิดการเลี้ยวเบนกับผลึกและช่องว่างแล้วสะท้อนออกจากโอปอมาเข้าตา เราจึงมองเห็นเป็นสีรุ้งสวยงาม



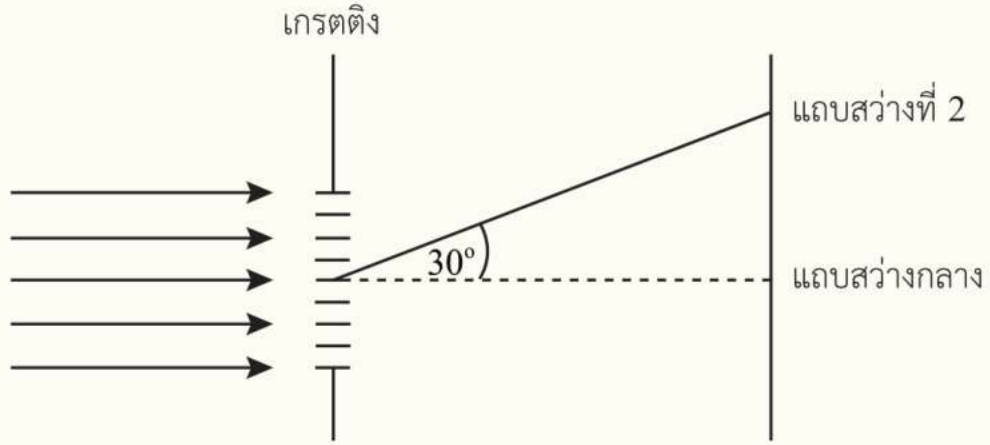
อย่างไรก็ตาม สีสันที่ปรากฏบนโอปอแต่ละชิ้นขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกและช่องว่างระหว่างผลึก โดยผลึกขนาดเล็กจะให้สีโทนน้ำเงิน ในขณะที่ผลึกขนาดใหญ่กว่าจะให้สีโทนแดง โอปอที่มีสีแดงมักจะมีสีสันอื่นปนมาด้วย การเล่นแสงจึงสวยงามกว่าโอปอที่มีแต่สีโทนน้ำเงิน โอปอที่มีสีแดงจึงหายากและมีราคาสูงกว่าโอปอสีน้ำเงิน

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 10.4

1. แสงขาวตกกระทบเกรตติงในแนวตั้งฉาก และเกิดภาพแทรกสอดบนฉาก มุมที่แสงแต่ละสีเบนไปจากแนวกลางขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงหรือไม่ อย่างไร
2. อธิบายภาพที่ปรากฏบนฉากเมื่อฉายแสงขาวผ่านเกรตติง

แบบฝึกหัด 10.4

1. แสงความยาวคลื่น 625 นาโนเมตร เมื่อผ่านเกรตติง แถบสว่างอันดับที่ 2 เบนไปจากแนวแถบสว่างกลางเป็นมุม 30 องศา ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัดข้อ 1

จงหาจำนวนช่องต่อเซนติเมตรของเกรตติงที่ใช้

2. ฉายแสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบในแนวตั้งฉากกับเกรตติงที่มีจำนวนช่อง 10 000 ช่องต่อเซนติเมตร เกิดแถบสว่างที่ 1 ทำมุม 30 องศากับแนวกลาง ถ้าเกรตติงอยู่ห่างจากฉาก 50 เซนติเมตร

ก. แถบสว่างที่ 1 อยู่ห่างจากแนวกลางเป็นระยะเท่าใดในหน่วยเซนติเมตร

ข. ความยาวคลื่นของแสงนี้มีค่าเท่าใดในหน่วยนาโนเมตร

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

10.1 แนวคิดเกี่ยวกับแสงเชิงคลื่น

- แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400–700 นาโนเมตร ซึ่งตามนุษย์รับรู้ได้ และแสดงพฤติกรรมการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนเช่นเดียวกับคลื่นกล

10.2 การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่

- การแทรกสอดของแสงตามการทดลองของ ธอมัส ยัง พิจารณาว่าเมื่อแสงผ่านสลิตคู่ ช่องของสลิตเหมือนกับเป็นแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ ทำให้เกิดการแทรกสอดของแสง ตำแหน่งบนฉากที่แทรกสอดแบบเสริม เกิดแถบสว่าง ซึ่งมีความต่างระยะทาง $\Delta r = n\lambda$ หรือ $d\sin\theta = n\lambda$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, \ldots$ ตำแหน่งบนฉากที่แทรกสอดแบบหักล้าง เกิดแถบมืด ซึ่งมีความต่างระยะทาง $\Delta r = (n-\frac{1}{2})\lambda$ หรือ $d\sin\theta = (n-\frac{1}{2})\lambda$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, \ldots$ โดยที่ ความกว้างของแถบสว่าง ความสว่าง และระยะห่างระหว่างแถบสว่างจะพอ ๆ กัน

10.3 การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

- เมื่อฉายแสงผ่านสลิตเดี่ยว จะเกิดการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดของแสง เกิดแถบสว่างและแถบมืดบนฉาก โดยแถบสว่างกลางจะกว้างและสว่างที่สุด แถบสว่างด้านข้างทั้งสองจะมีความสว่างลดลงตามลำดับ ตำแหน่งที่เป็นแถบมืดพิจารณาโดยแบ่งช่องสลิตออกเป็นส่วน ๆ แล้วใช้หลักการของฮอยเกนส์กำหนดจุดบนหน้าคลื่นที่ผ่านสลิตแต่ละส่วนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นที่จับคู่กันแล้วหักล้างกันซึ่งทำให้ได้ความสัมพันธ์ $a\sin\theta_n = n\lambda$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, ..$
- ทั้งสลิตคู่และสลิตเดี่ยว ถ้าสลิตอยู่ห่างฉากมาก ๆ และค่ามุม $\theta < 10^\circ$ ทำให้ $\sin\theta \approx \tan\theta$ โดยสลิตคู่สามารถใช้ความสัมพันธ์ $d\frac{x}{L} = n\lambda$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, \ldots$ และ $d\frac{x}{L} = (n-\frac{1}{2})\lambda$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, \ldots$ ในการหาแถบสว่างและแถบมืดตามลำดับ และสำหรับสลิตเดี่ยวใช้ $a\frac{x}{L} = n\lambda$ เมื่อ $n = 1, 2, 3, \ldots$ ในการหาแถบมืด
- เมื่อแสงผ่านสลิตคู่ซึ่งความกว้างของช่องมากกว่าความยาวคลื่นแสง จะเกิดการเลี้ยวเบนและการแทรกสอด ทำให้เกิดแถบสว่างกลางกว้างและสว่างมากกว่าแถบสว่างด้านข้างที่มีความสว่างลดลงตามลำดับ แต่ในแถบสว่างแต่ละแถบเกิดริ้วของแถบมืดที่เกิดจากการแทรกสอดอยู่ภายใน

10.4 การเลี้ยวของแสงผ่านเกรตติง

- เกรตติงเป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ประกอบด้วยช่องแคบจำนวนมากเมื่อแสงผ่านจะเลี้ยวเบน ทำให้แสงแต่ละสีแยกออกจากกันเนื่องจากแสงแต่ละสีเลี้ยวเบนในมุมที่ต่างกัน หาตำแหน่งของแสงแต่ละสีจากความสัมพันธ์ $d\sin\theta_n = n\lambda$ หรือ $d\frac{x}{L} = n\lambda$ เมื่อ $n = 0, 1, 2, ...$
- ตัวอย่างปรากฏการณ์ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนและแทรกสอดของแสง ได้แก่ การเห็นสีต่าง ๆ บนฟองสบู่ การเห็นสีบนแผ่นซีดี และสีในโอปอ เป็นต้น

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 10

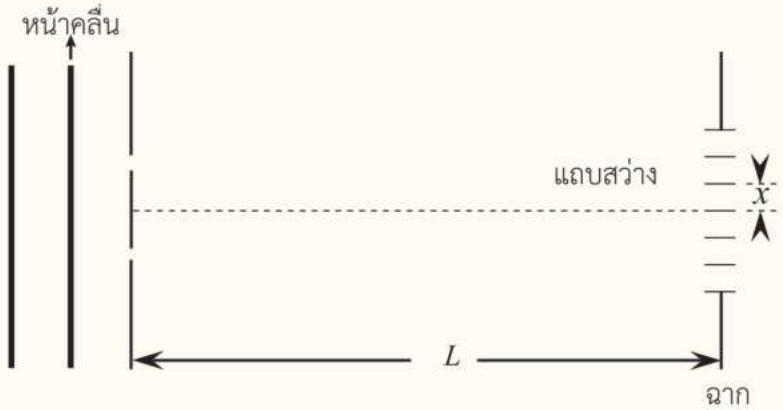
คำถาม

1. เพราะเหตุใดการเลี้ยวเบนของแสงจึงพบเห็นได้ยาก แต่การเลี้ยวเบนของเสียงจึงพบได้ทั่วไป
2. คลื่นแสงจากสองแหล่งกำเนิดแสงต้องมีความต่างระยะทางเป็นเท่าไรจึงจะทำให้การแทรกสอดที่เกิดขึ้นเป็นแบบ

   ก) เสริมกัน ข) หักล้างกัน
3. เราสามารถยกมือบังแสงแดดไม่ให้มาเข้าตาเราได้ ทำไมเราไม่สามารถใช้วิธีเดียวกันนี้ป้องกันไม่ให้เสียงมาเข้าหูเราได้
4. เมื่อฉายแสงผ่านสลิตเดี่ยว ถ้าความกว้างของช่องสลิตแคบลง ความกว้างของแถบสว่างกลางจะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร เพราะอะไร
5. วิธีการสังเกตการเลี้ยวเบนของแสงที่ง่ายที่สุดคือ การมองไปยังแหล่งกำเนิดแสงผ่านช่องระหว่างนิ้วมือที่ชิดกัน วิธีดังกล่าวจะเกิดผลอย่างไร เพราะอะไร
6. เสียงสามารถเลี้ยวเบนผ่านขอบของมุมอาคารได้ ทำให้ผู้ฟังที่อยู่อีกด้านหนึ่งของอาคารสามารถได้ยินเสียงได้เพราะเหตุใดแสงจึงไม่เกิดปรากฏการณ์เช่นนี้

ปัญหา

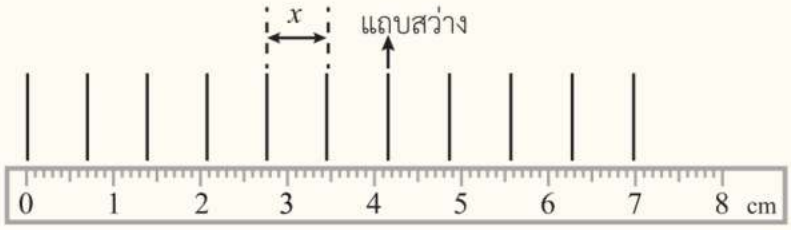
1. แสงมีความยาวคลื่น 6.5×10^{-7} เมตร ตกกระทบตั้งฉากกับแนวสลิตคู่ ถ้าสลิตทั้งสองอยู่ห่างกัน 2.5×10^{-4} เมตร เกิดภาพการแทรกสอดบนฉากที่อยู่ห่างจากสลิตคู่เป็นระยะ L ให้ x คือ ระยะที่แถบสว่างแรกอยู่ห่างจากแถบสว่างกลาง ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 1

ถ้า L มีค่า 1 เมตร x จะมีค่าเท่าใด

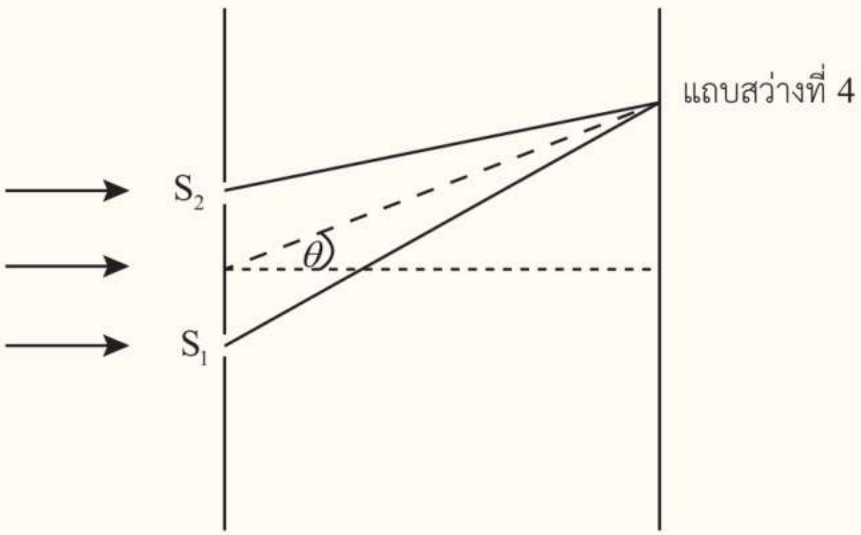
2.



รูป ประกอบปัญหาข้อ 2

จากรูประยะห่างของแถบสว่างมีค่าเท่าใด

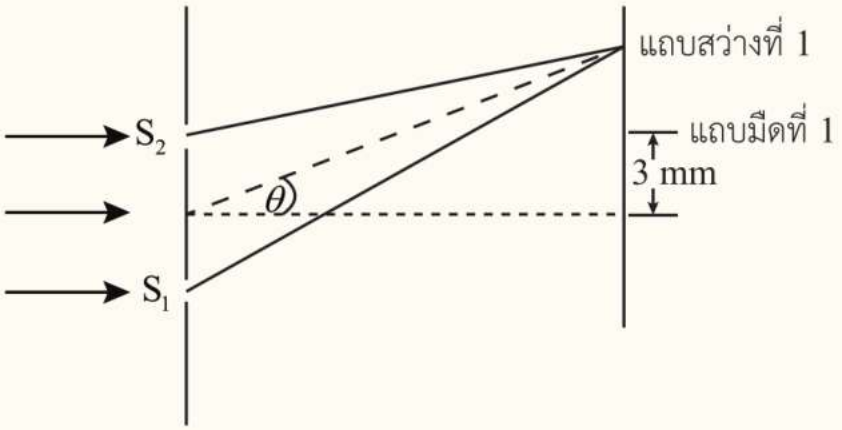
3. ในการทดลองหาความยาวคลื่นของแสงสีหนึ่ง โดยฉายแสงตั้งฉากกับแผ่นสลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างสลิต 0.20 มิลลิเมตร เกิดการแทรกสอดของแสงบนฉาก ซึ่งห่างจากแผ่นสลิต 1.0 เมตร พบว่า แถบสว่างที่ 4 อยู่ห่างจากแนวกลาง 1.2 เซนติเมตร แสงนี้มีความยาวคลื่นเท่าใดในหน่วยนาโนเมตร
4. แสงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ส่องตั้งฉากกับสลิตคู่ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างสลิต 0.5 มิลลิเมตร และอยู่ห่างจากฉาก 2 เมตร แถบสว่างถัดกันที่ปรากฏบนฉากห่างกันเท่าใดในหน่วยมิลลิเมตร
5. ฉายแสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตั้งฉากกับสลิตคู่ เกิดการแทรกสอดของแสงบนฉากซึ่งห่างจากแผ่นสลิต 1.0 เมตร ถ้าวัดระยะห่างระหว่างแถบสว่าง 2 แถบถัดกันได้ 5 มิลลิเมตร แผ่นสลิตนี้มีระยะห่างระหว่างสลิตเท่าใดในหน่วยไมโครเมตร
6. แสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตั้งฉากกับสลิตคู่ที่ช่องสลิตอยู่ห่างกัน 200 ไมโครเมตร แถบสว่างที่ 4 เบนจากแถบสว่างกลางเป็นมุม 0.63 องศา ซึ่งมีค่า $\sin 0.63 = 0.011$ ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 6

แสงมีความยาวคลื่นเท่าใดในหน่วยนาโนเมตร

7. แสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตั้งฉากกับสลิตคู่เกิดแถบสว่างแถบมืด ดังรูป

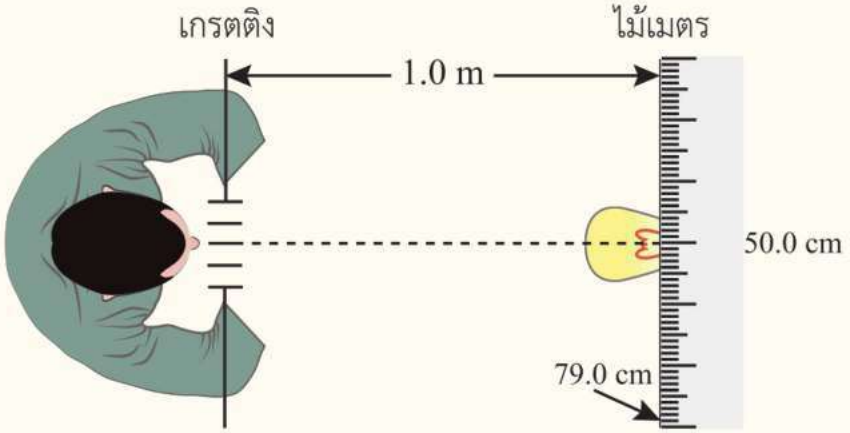


รูป ประกอบปัญหาข้อ 7

แถบมืดที่ 1 บนฉากเบนจากเส้นแนวกลางเป็นระยะ 3 มิลลิเมตร แถบสว่างที่ 1 บนฉากจะเบนจากเส้นแนวกลางเป็นระยะเท่าใดในหน่วยมิลลิเมตร

8. ในการเกิดการแทรกสอดของแสงที่มีความยาวคลื่น 6.5×10^{-7} เมตร โดยใช้ช่องขนาดเล็ก 2 ช่อง ให้เกิดบนฉากที่อยู่ห่างออกไป 1.0 เมตร ถ้าต้องการให้แถบสว่าง 2 แถบที่ติดกันอยู่ห่างกัน 1.0×10^{-7} เมตร ช่องทั้งสองจะต้องอยู่ห่างกันเท่าใด (ให้ถือว่าตำแหน่งแถบสว่างเบนไปจากเส้นแนวกลางน้อยมาก)
9. แสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตั้งฉากกับสลิตเดี่ยวที่มีความกว้าง 250 ไมโครเมตร ความกว้างของแถบสว่างกลางบนฉากมีขนาด 5 มิลลิเมตร ถ้าเปลี่ยนเป็นสลิตเดี่ยวที่มีความกว้าง 50 ไมโครเมตร แถบสว่างกลางบนฉากเดิมจะกว้างเท่าใดในหน่วยมิลลิเมตร
10. ฉายแสงความยาวคลื่น 500 นาโนเมตร ตกกระทบตั้งฉากกับสลิตเดี่ยวที่อยู่ห่างจากฉาก 1.20 เมตร พบว่าแถบมืดแรกห่างจากกึ่งกลางของแถบสว่างกลาง 0.02 เมตร จงหาความกว้างของสลิตในหน่วยไมโครเมตร
11. แสงความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ตกกระทบตั้งฉากกับแผ่นสลิตเดี่ยวที่กว้าง 200 ไมโครเมตร ระยะห่างระหว่างแถบมืดที่อยู่ด้านข้างของแถบสว่างกลางที่ตกบนฉากห่างกัน 1.0 เซนติเมตร ฉากอยู่ห่างจากแผ่นสลิตเดี่ยวเป็นระยะเท่าใดในหน่วยเมตร

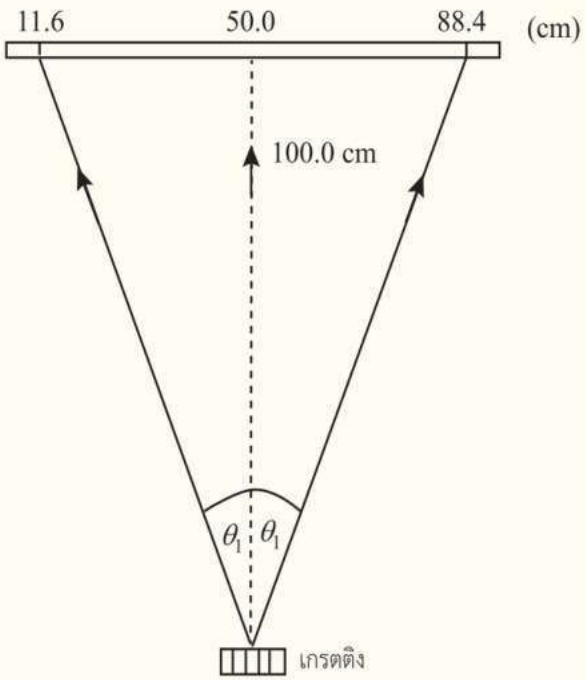
12.มองไส้หลอดไฟที่ส่องสว่างผ่านเกรตติงที่มีจำนวน 5000 ช่องต่อเซนติเมตร โดยให้เกรตติงอยู่ห่างจากไส้หลอดไฟ 1.0 เมตร และไส้หลอดอยู่ที่ตำแหน่ง 50.0 เซนติเมตรของไม้เมตร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 12

สำหรับแสงสีหนึ่งในแถบสเปกตรัมอันดับที่ 1 ปรากฏบนไม้เมตรที่ตำแหน่ง 79.0 เซนติเมตร แสงสีนั้นมีความยาวคลื่นเท่าใดในหน่วยนาโนเมตร

13.ในการทดลองเพื่อหาความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ โดยใช้เกรตติงที่มี 5000 ช่องต่อเซนติเมตร พบว่า แถบสว่างอันดับที่ 1 ทางด้านซ้ายและขวา อยู่ที่ตำแหน่ง 11.6 และ 88.4 เซนติเมตรของไม้เมตร ตามลำดับ ถ้าฉากอยู่ห่างเกรตติงเป็นระยะ 100.0 เซนติเมตร ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 13

ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์มีค่าเท่าใด

14. ฉายแสงขาวตั้งฉากกับเกรตติงที่มีจำนวนช่อง 10 000 ช่องต่อเซนติเมตร จะปรากฏแถบสเปกตรัมอันดับที่สองในช่วงความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรถึง 700 นาโนเมตรได้ครบทุกความยาวคลื่นหรือไม่ แสดงเหตุผลประกอบคำตอบ

ปัญหาท้าทาย

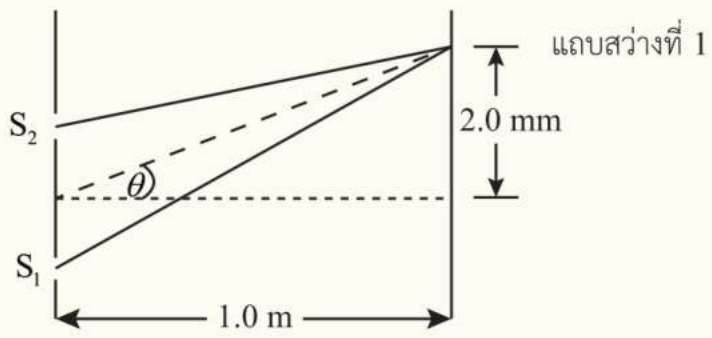
15. แสงความยาวคลื่น λ_1 และ λ_2 ตกกระทบตั้งฉากกับสลิตคู่ พบว่าภาพการแทรกสอดที่ปรากฏบนฉากของแถบมืดที่ 3 ของแสง λ_1 เกิดที่เดียวกับแถบสว่างที่ 2 ของแสง λ_2 อัตราส่วนระหว่าง λ_1 กับ λ_2 เป็นเท่าใด

16. แสงสีเขียวความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ตกกระทบตั้งฉากกับสลิตคู่ ถ้าที่ตำแหน่งการแทรกสอดห่างจากจุดกึ่งกลางของแถบสว่างกลางเป็นระยะ 1.1 เซนติเมตร มีเฟสต่างกัน 4π เรเดียน ระยะห่างของสลิตคู่มีค่าเท่าใดถ้าฉากอยู่ห่างออกไป 1.0 เมตร

17. เมื่อใช้แสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่น 5.2×10^{-7} เมตร ตกกระทบสลิตคู่ในแนวตั้งฉาก เกิดภาพแทรกสอดบนฉาก ถ้าแถบสว่าง 2 แถบที่ติดกันอยู่ห่างกัน 0.2 มิลลิเมตร แต่ถ้าใช้แสงสีแดงที่มีความยาวคลื่น 6.5×10^{-7} เมตร แทน แถบสว่าง 2 แถบที่ติดกันจะอยู่ห่างกันกี่มิลลิเมตร

18. สลิตคู่ที่อยู่ห่างกัน d และอยู่ห่างจากฉาก D เมื่อฉายแสงความยาวคลื่น λ ตั้งฉากกับสลิตคู่ เกิดการแทรกสอดของแสง ปรากฏเป็นแถบสว่างและแถบมืดบนฉาก ระยะห่างระหว่างแถบมืดที่ 1 กับแถบมืดที่ 2 ของภาพบนฉาก จะเป็นเท่าใด ในเทอม λ D และ d

19. แสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตั้งฉากกับสลิตคู่เกิดการแทรกสอดบนฉาก ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 5

แถบสว่างที่ 1 เบนไปจากแนวเส้นกลางเป็นระยะ 2.0 มิลลิเมตร เมื่อฉากอยู่ห่างจากสลิต 1.0 เมตร ถ้าต้องการให้แถบสว่างที่ 1 เบนไปจากแนวเส้นกลางเป็นระยะ 3 มิลลิเมตร ต้องให้ฉากอยู่ห่างจากสลิตเป็นระยะเท่าใดในหน่วยเมตร

20. ถ้าใช้เลเซอร์สีแดงฉายผ่านสลิตคู่ที่มีระยะระหว่างช่อง 25 ไมโครเมตร จึงเกิดภาพการแทรกสอดบนกระดานที่อยู่ห่างจากสลิต 2.30 เมตร วัดระยะระหว่างแถบสว่างที่ 3 ทั้งสองข้างของแถบสว่างกลางได้ 35 เซนติเมตร แสงเลเซอร์ที่ใช้มีความยาวคลื่นเท่าใด
21. ในการทดลองให้แสงความยาวคลื่นเดียวตกกระทบตั้งฉากกับสลิตคู่และสลิตเดี่ยว ถ้าต้องการให้ตำแหน่งมืดที่ 2 ของการแทรกสอดของแสงบนฉากที่ผ่านสลิตคู่ ตรงกับตำแหน่งมืดที่ 2 ของการเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว ต้องใช้สลิตคู่ที่มีระยะระหว่างสลิตเป็นกี่เท่าของความกว้างสลิตเดี่ยว
22. ฉายแสงความยาวคลื่น 560 นาโนเมตร ตกกระทบตั้งฉากกับแผ่นสลิตเดี่ยวที่กว้าง 10 ไมโครเมตร แถบสว่างกลางรองรับมุมที่จุดกึ่งกลางของสลิตเดี่ยวกี่องศา
23. ในการทดลองหาเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดโลหะเส้นหนึ่งโดยการเลี้ยวเบนของแสง พบว่าเลเซอร์สามารถเลี้ยวเบนผ่านลวด แล้วเกิดแถบสว่าง-มืดที่ฉากรับ โดยที่ระยะทางระหว่างแถบมืดที่ 1, 2 และ 3 อยู่ห่างจากบริเวณสว่างกลางเท่ากับ 1 เซนติเมตร 2 เซนติเมตร และ 3 เซนติเมตร ตามลำดับ ถ้าฉากรับอยู่ห่างจากลวดเป็นระยะทาง 1.00 เมตร จงหาเส้นผ่านศูนย์กลางของลวดโลหะ ถ้าใช้เลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ที่มีความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร
24. แสงความยาวคลื่น λ ตกกระทบตั้งฉากกับสลิตเดี่ยวที่มีความกว้างของช่อง d ทำให้ความกว้างของแถบสว่างกลางบนฉากเป็น a ถ้าฉากรับภาพอยู่ห่างจากสลิตเป็นระยะ L และ $\frac{d}{\lambda}$ มีค่าเท่ากับ 200 ระยะ L เป็นกี่เท่าของความกว้าง a
25. เมื่อให้แสงที่เปล่งจากหลอดบรรจุไฮโดรเจนตกกระทบแผ่นเกรตติงอันหนึ่ง ในแนวตั้งฉากปรากฏว่า เส้นสเปกตรัมอันดับที่ 2 ที่เกิดเนื่องจากแสงสีแดง ซึ่งมีความยาวคลื่น 656 นาโนเมตร ซ้อนทับเส้นสเปกตรัมอันดับที่ 3 ของแสงสีอื่นอีกสีหนึ่ง แสงสีนั้นมีความยาวคลื่นเท่าใด ในหน่วยนาโนเมตร
26. ถ้าใช้เกรตติงที่มีจำนวนช่อง 5000 ช่องต่อเซนติเมตร และเกรตติงที่มีจำนวนช่อง 10 000 ช่องต่อเซนติเมตร รับแสงขาวที่มาตกกระทบตั้งฉาก ทำให้เกิดสเปกตรัมของแสงขาว ความยาวคลื่น 400 นาโนเมตรถึง 700 นาโนเมตร เกรตติงแต่ละแผ่นจะให้สเปกตรัมสูงสุดกี่อันดับ
27. ถ้าใช้เกรตติงที่มีจำนวนช่อง 8000 ช่องต่อเซนติเมตร รับแสงขาวความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตร ที่ตกกระทบตั้งฉาก ทำให้เกิดสเปกตรัมของแสงบนฉากที่อยู่ห่างจากเกรตติง 1.0 เมตร ความกว้างของแถบสเปกตรัมอันดับที่หนึ่งที่ปรากฏบนฉากเป็นเท่าใด ในหน่วยเซนติเมตร
28. ฉายแสงความยาวคลื่น 450 - 600 นาโนเมตร ตกกระทบตั้งฉากกับเกรตติงที่มี 10 000 ช่องต่อเซนติเมตร จะเกิดชุดสเปกตรัมครบทุกความยาวคลื่นถึงอันดับที่เท่าใด

บทที่ 11 แสงเชิงรังสี

ipst.me/8890

เสาชิงช้า ตั้งอยู่ที่แขวงสำราญราษฎร์ เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร มีลักษณะเป็นเสาไม้สัก สูง 21.5 เมตร ทาด้วยสีแดงชาด ตั้งอยู่บนแท่นหินขนาดใหญ่ ใช้ในการประกอบพิธีโล้ชิงช้า ซึ่งเป็นหนึ่งในพิธีของศาสนาพราหมณ์-ฮินดู กรมศิลปากรได้ประกาศขึ้นทะเบียนเสาชิงช้าเป็นโบราณสถานสำคัญของชาติเมื่อวันที่ 22 พฤศจิกายน พ.ศ. 2492 ทั้งนี้ เสาชิงช้าได้ถือเป็นหนึ่งในสถานที่ที่ดึงดูดให้นักท่องเที่ยวมาเยี่ยมชมจำนวนมากในแต่ละปี เหตุใด ภาพของเสาชิงช้าที่ปรากฏบนลูกแก้วทรงกลมจึงเป็นภาพหัวกลับและมีขนาดเล็กลง จะศึกษาได้จากบทเรียนนี้

คำถามสำคัญ

- การมองเห็นภาพที่เกิดจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของแสงเกิดขึ้นได้อย่างไร
- ความเข้าใจเกี่ยวกับการเกิดภาพจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ของแสงนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวันได้อย่างไร

จุดประสงค์การเรียนรู้

11.1 การสะท้อนและการหักเหของแสง

1. ทดลองและอธิบายการสะท้อนของแสง กฎการสะท้อนของแสง
2. ทดลองและอธิบายการหักเหของแสง กฎของสเนลล์
3. อธิบายมุมวิกฤต การสะท้อนกลับหมด และการกระจายของแสงเมื่อผ่านปริซึม

11.2 การมองเห็นและการเกิดภาพ

4. อธิบายวิธีการเขียนรังสีของแสงและการเกิดภาพ การระบุตำแหน่งและชนิดของภาพ
5. เขียนรังสีของแสงและอธิบายการเกิดภาพ ระบุตำแหน่งและชนิดของภาพที่เกิดจากการสะท้อนของแสงจากกระจกเงาราบ
6. เขียนรังสีของแสง อธิบายและคำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ของการเกิดภาพที่เกิดจากการหักเหของแสงที่ผ่านตัวกลางที่ต่างกัน

11.3 ภาพจากเลนส์บางและกระจกเงาทรงกลม

7. เขียนรังสีของแสงที่หักเหผ่านเลนส์บางเพื่อระบุตำแหน่งและชนิดของภาพ
8. คำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดภาพจากเลนส์บาง
9. เขียนรังสีของแสงที่สะท้อนจากผิวของกระจกเงาทรงกลมเพื่อระบุตำแหน่งและชนิดของภาพ
10. คำนวณหาปริมาณต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดภาพจากกระจกเงาทรงกลม

11.4 แสงสีและการมองเห็นแสงสี

11. อธิบายการมองเห็นแสงสี สีของวัตถุ และสาเหตุของการบอดสี
12. อธิบายการผสมแสงสี และการผสมสารสี

11.5 การอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติและการใช้ประโยชน์เกี่ยวกับแสง

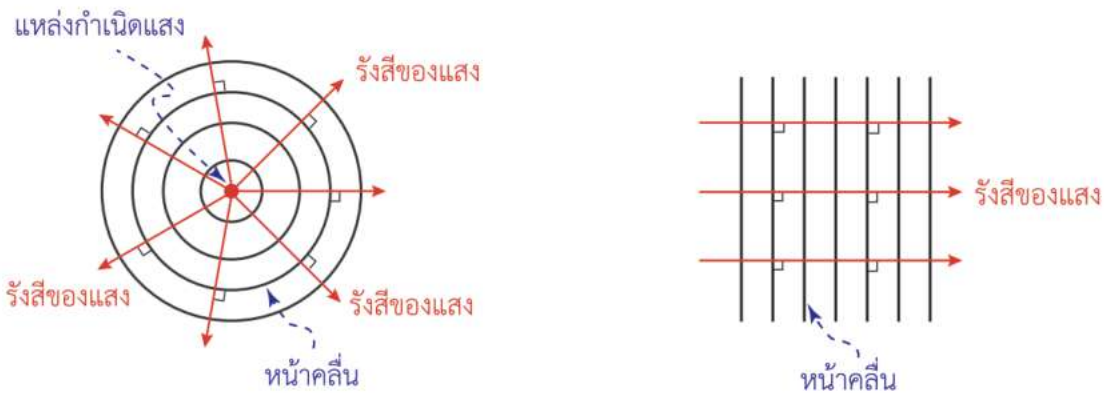
13. อธิบายการเกิดรุ้ง การทรงกลด มิราจ และการมองเห็นท้องฟ้าเป็นสีต่าง ๆ ในช่วงเวลาที่ต่างกัน
14. อธิบายการนำความรู้เรื่องแสงเชิงรังสีไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน

ความรู้ก่อนเรียน

ธรรมชาติของแสง การสะท้อน การหักเหของแสง การกระจายของแสงผ่านปริซึม

ในการอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับแสงนั้น นักฟิสิกส์ได้นำแนวคิดและแบบจำลองหลายรูปแบบมาใช้ เช่น การพิจารณาว่าแสงเป็นคลื่นจึงมีสมบัติเหมือนกับคลื่นชนิดอื่น ๆ การมองว่าแสงเป็นคลื่นนั้นสามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับการเลี้ยวเบนและแทรกสอดของแสงได้เป็นอย่างดี ดังที่เราได้ศึกษามาแล้วในบทที่ 10 เรื่องแสงเชิงคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่เกี่ยวกับการสะท้อนและการหักเหของแสง จะนิยมใช้มุมมองของแสงอีกรูปแบบหนึ่ง นั่นคือ การมอง**แสงเชิงรังสี** (ray optics) เพราะการมองแสงเชิงรังสีสามารถนำไปใช้อธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวได้ง่ายด้วยเรขาคณิต ทำให้นิยมเรียกมุมมองแสงเชิงรังสีอีกชื่อหนึ่งว่า **แสงเชิงเรขาคณิต** (geometrical optics) ทั้งนี้มีหลายวิธีในการบอกว่ารังสีของแสงคืออะไร ซึ่งวิธีหนึ่งก็คือการเชื่อมโยงรังสีของแสงเข้ากับความรู้เรื่องแสงเชิงคลื่น โดยกำหนดให้เส้นตรงที่ตั้งฉากกับหน้าคลื่น และมีลูกศรแสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแสง เรียกว่า **รังสีของแสง** (light ray) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า **รังสี** (ray)

รังสีของแสงบอกทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงโดยมีทิศทางที่ตั้งฉากกับหน้าคลื่น ดังรูป 11.1



ก. รังสีของแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด ข. รังสีของแสงที่เดินทางมาจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ไกลมาก

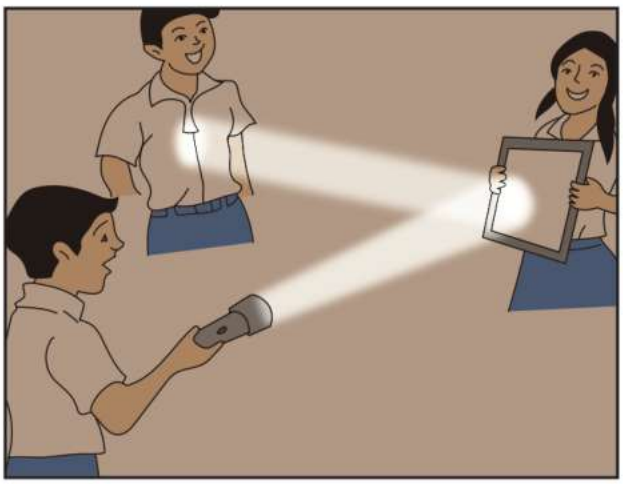
รูป 11.1 แนวรังสีของแสงที่มีทิศทางตั้งฉากกับหน้าคลื่นแสง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงการสะท้อนของแสง การหักเหของแสง การมองเห็นของมนุษย์ ทั้งการเห็นภาพและแสงสีต่าง ๆ รวมทั้งการอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติเกี่ยวกับแสงโดยใช้รังสีของแสง

11.1 การสะท้อนและการหักเหของแสง

11.1.1 การสะท้อนของแสง

การสะท้อนของแสง (reflection of light) เป็นปรากฏการณ์ที่เราเห็นได้ในชีวิตประจำวัน เช่น ถ้าเราฉายแสงจากเลเซอร์พอยเตอร์หรือจากไฟฉายไปยังกระจกก็จะพบการสะท้อนของแสงออกมา ดังรูป 11.2 แม้แต่การที่เราเห็นหน้าของเราในกระจกเงา ก็เป็นผลจากการสะท้อนของแสง การสะท้อนของแสงที่ผิววัตถุมีลักษณะอย่างไร ลักษณะอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 11.1



รูป 11.2 การสะท้อนของแสง

กิจกรรม 11.1 กฎการสะท้อนของแสง

จุดประสงค์

อธิบายระนาบของรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นแนวฉาก และความสัมพันธ์ระหว่างมุมตกกระทบกับมุมสะท้อน

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดกล่องแสง	1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำขนาด 12 โวลต์	1 เครื่อง
3. แท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมผืนผ้า	1 แท่ง
4. ผิวสะท้อนเว้าและนูน	1 อัน
5. ครึ่งวงกลมวัดมุม	1 อัน
6. กระดาษขาว	1 แผ่น

วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อหลอดไฟฟ้าของกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงโวลต์ต่ำขนาด 12 โวลต์
2. วางกระดาษขาวหน้ากล่องแสง จากนั้นใส่แผ่นช่องแสงที่มี 1 ช่อง ที่หน้ากล่องแสง แล้วจัดให้ลำแสงขนานกับระนาบของกระดาษ

3. วางแท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้ากล่องแสง โดยให้หน้าขุ่นทาบกับกระดาษขาวบนโต๊ะ ดังรูป

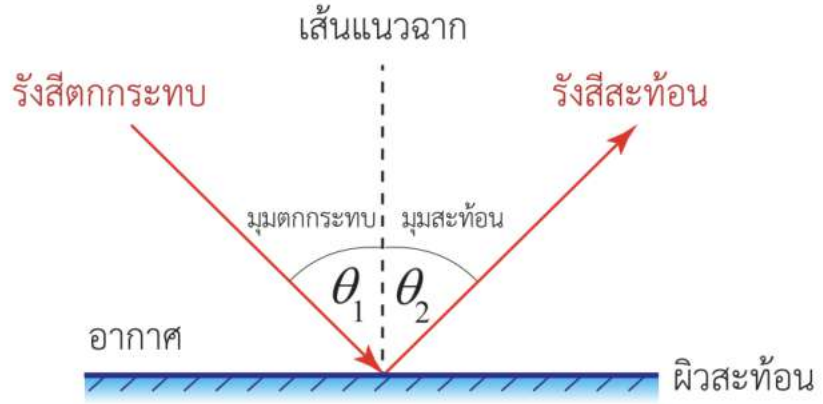
รูป การจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการสะท้อนของแสง

4. ลากเส้นตรงแทนแนวขอบของแท่งพลาสติก
5. จัดกล่องแสงให้ลำแสงตกกระทบผิวของแท่งพลาสติกโดยทำมุม 30 องศา กับผิวของแท่งพลาสติก เปิดหม้อแปลงโวลต์ต่ำเพื่อให้กล่องแสงทำงาน สังเกตแสงที่สะท้อนกับผิวของแท่งพลาสติก
6. ลากรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นแนวฉาก จากนั้น วัดมุมตกกระทบและมุมสะท้อน
7. ทำซ้ำข้อ 5 - 6 โดยเปลี่ยนมุมตกกระทบอีก 2 ค่า
8. ทำซ้ำข้อ 3 - 7 โดยเปลี่ยนแท่งพลาสติกเป็นผิวสะท้อนเว้าและผิวสะท้อนนูน ตามลำดับ

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ รังสีกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นแนวฉากอยู่ในระนาบเดียวกันหรือไม่
- ☐ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่ผิวสะท้อนของแท่งพลาสติกเท่ากันทุกครั้งหรือไม่ อย่างไร
- ☐ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่ผิวสะท้อนนูนเท่ากันทุกครั้งหรือไม่ อย่างไร
- ☐ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนที่ผิวสะท้อนเว้าเท่ากันทุกครั้งหรือไม่ อย่างไร

การสะท้อนของแสงเกิดขึ้นเมื่อแสงเดินทางไปถึงผิวสะท้อน ซึ่งอาจจะเป็นกระจกเงาหรือพื้นผิวอื่น ๆ ที่สามารถสะท้อนแสงได้และไม่จำเป็นต้องเป็นผิวที่เรียบ จากการทำกิจกรรม 11.1 จะเห็นว่าการสะท้อนของแสงนั้นมีรูปแบบที่ชัดเจน ซึ่งสามารถศึกษาได้จากการเขียนรังสีของแสง และหาความสัมพันธ์ระหว่าง**มุมตกกระทบ** (angle of incidence) กับ**มุมสะท้อน** (angle of reflection) ดังรูป 11.3 โดยมุมตกกระทบเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำกับเส้นสมมติที่ตั้งฉากกับผิวสะท้อนซึ่งเรียกว่า**เส้นแนวฉาก** (normal line) ซึ่งในที่นี้คือ θ_1 ส่วนมุมสะท้อนคือมุมที่**รังสีสะท้อน** (reflected ray) ทำกับเส้นแนวฉากคือ θ_2

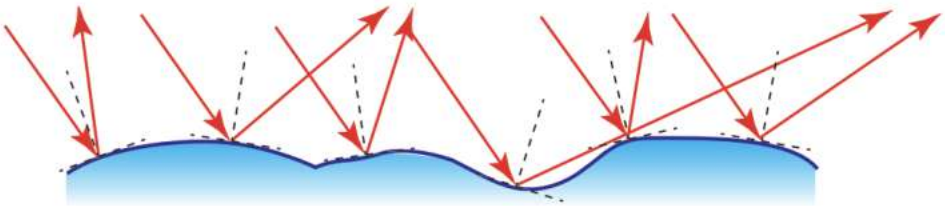


รูป 11.3 การสะท้อน เขียนโดยใช้แผนภาพรังสี

จากการทำกิจกรรม 11.1 สามารถสรุปเป็น**กฎการสะท้อน** (law of reflection) ได้ว่า

1. มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน $\left(\theta_1 = \theta_2\right)$
2. รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นแนวฉาก อยู่ในระนาบเดียวกัน

ในกรณีที่ผิวสะท้อนมีความขรุขระ เช่น แผ่นกระดาษที่ยับ พื้นคอนกรีตที่ไม่เรียบ การสะท้อนของแสงก็ยังคงเป็นไปตามกฎการสะท้อน โดยมักจะมีการเข้าใจผิดว่า การสะท้อนของแสงจากพื้นผิวที่ไม่เรียบ นั้นไม่เป็นไปตามกฎการสะท้อนเพราะรังสีสะท้อนไม่ได้ขนานกัน ทั้งที่รังสีตกกระทบก็เป็นรังสีขนานดังรูป 11.4 ซึ่งสิ่งที่มักจะถูกลืมคือ เส้นแนวฉากที่แต่ละจุดบนพื้นผิวที่เกิดการสะท้อนนั้นไม่ได้ขนานกัน จึงทำให้มุมตกกระทบที่แต่ละจุดไม่เท่ากันตามไปด้วย ดังนั้น การพิจารณาว่ามุมตกกระทบมีค่าเท่าใดก็ยังคงเป็นไปตามกฎการสะท้อนของแสง

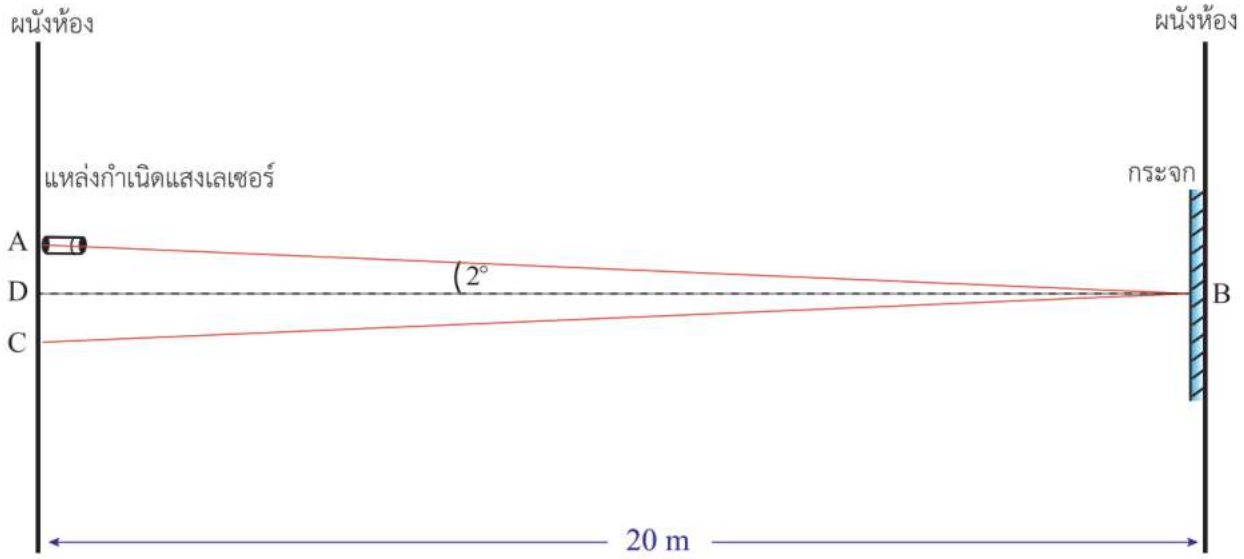


รูป 11.4 การสะท้อนที่ผิวขรุขระ ยังเป็นไปตามกฎการสะท้อน

การสะท้อนของแสงบนวัสดุที่มีผิวขรุขระทำให้แสงสะท้อนออกมานั้นมีทิศทางที่หลากหลาย และไม่ทำให้ความเข้มแสงในทิศทางใดทิศทางหนึ่งมีค่ามากเกินไป จึงทำให้สามารถมองเห็นวัตถุนั้นได้ในหลาย ๆ มุม รวมทั้งมองเห็นวัตถุนั้นได้โดยไม่มีจุดใดจุดหนึ่งที่สว่างหรือมืดมากจนเกินไป

ตัวอย่าง 11.1 ถ้ายิงแสงเลเซอร์จากผนังด้านหนึ่งของห้องไปกระทบกระจกเงาราบที่แขวนไว้ที่ผนังอีกด้านหนึ่งที่อยู่ห่างออก 20 เมตร โดยที่แสงเลเซอร์มีมุมตกกระทบกระจกเท่ากับ 2 องศา จงหาว่าแสงที่สะท้อนกลับมาจะกระทบผนังห่างจากบริเวณที่แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ตั้งอยู่เป็นระยะทางเท่าใด (กำหนดให้ $\tan 2^\circ = 0.0349$)

แนวคิด เมื่อแสงตกกระทบกระจกเงาราบจะเกิดการสะท้อนโดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน เขียนแผนภาพการสะท้อน ดังรูป



รูป ประกอบตัวอย่าง 11.1

จะได้สามเหลี่ยม ABC ที่มีมุม ABC เท่ากับ 4 องศา โดยมีระยะ DB เท่ากับ 20 เมตร

วิธีทำ จากกฎการสะท้อนทำให้รู้ว่า $\overline{AD} = \overline{AC} \times \frac{1}{2}$

จาก $\overline{AD} = \overline{DB} \tan 2^\circ$

แทนค่า $\overline{AD} = (20\ \text{m}) \tan 2^\circ$

$= 0.697\ \text{m}$

$= 0.7\ \text{m}$

ดังนั้น $\overline{AC} = 2\overline{AD} = 1.4\ \text{m}$

ตอบ แสงที่สะท้อนกลับมาจะกระทบผนังห่างจากบริเวณที่เลเซอร์ตั้งอยู่เป็นระยะทาง 1.4 เมตร

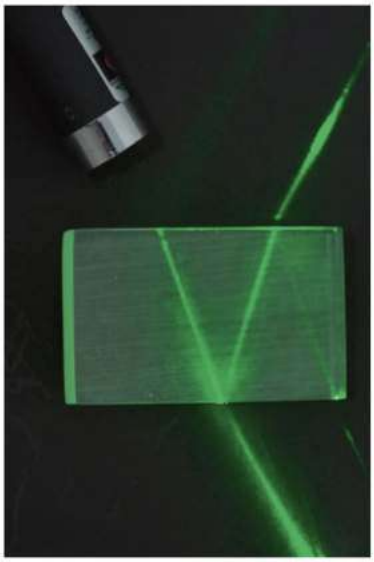
รู้หรือไม่

ในการสำรวจดวงจันทร์ในอดีต เช่น ยานอพอลโล 11 ยานอพอลโล 14 และ ยานอพอลโล 15 ได้มีการนำอุปกรณ์สะท้อนแสงไปวางที่ดวงจันทร์ เพื่อใช้ในการทดลองด้วยการยิงแสงเลเซอร์จากโลกให้สะท้อนที่ดวงจันทร์แล้วกลับมายังโลก เพื่อวัดระยะเวลาที่แสงใช้ในการเดินทางจากโลกไปดวงจันทร์และสะท้อนกลับมายังโลก ซึ่งใช้เวลาประมาณ 2.5 วินาที และเมื่อคำนวณระยะห่างระหว่างโลกกับดวงจันทร์จะได้ประมาณ 385001 กิโลเมตร การทดลองดังกล่าวยังนำไปสู่การทดสอบสมมติฐานใหม่ ๆ เกี่ยวกับดวงจันทร์ เช่น ระยะทางระหว่างดวงจันทร์กับโลกมีขนาดเพิ่มขึ้นหรือไม่ ซึ่งทำให้ตรวจสอบได้ว่า แรงโน้มถ่วงระหว่างดวงจันทร์กับโลกมีค่าคงตัวหรือไม่

รูป ตัวสะท้อนแสงเลเซอร์บนดวงจันทร์

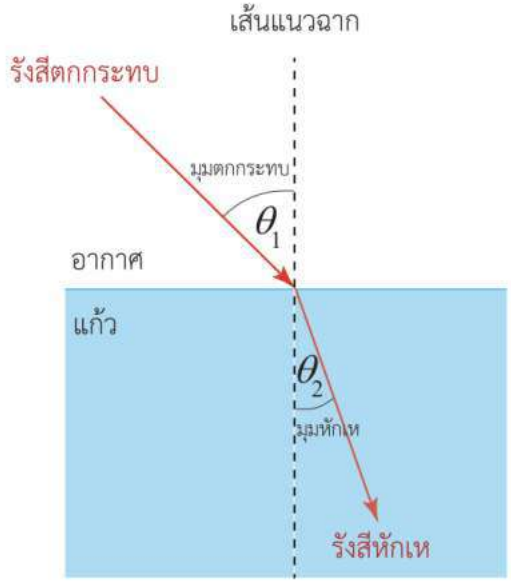
11.1.2 การหักเหของแสง

การหักเหของแสง (refraction of light) เป็นปรากฏการณ์ทางแสงที่เห็นได้อย่างชัดเจน เพราะเมื่อเกิดขึ้นจะทำให้แสงเปลี่ยนแนวทางไปจากเดิม โดยเกิดขึ้นเมื่อแสงมีการเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง เช่น แสงเลเซอร์ที่เดินทางจากอากาศเข้าไปในแท่งแก้ว และเดินทางจากแก้วออกสู่อากาศ ดังรูป 11.5



รูป 11.5 การเปลี่ยนแนวทางรังสีของแสงเมื่อแสงหักเหที่ผิวรอยต่อระหว่างอากาศกับแก้ว

แผนภาพรังสีสำหรับอธิบายปรากฏการณ์การหักเหของแสง แสดงได้ดังรูป 11.6 โดยรังสีตกกระทบทำมุมตกกระทบ θ_1 กับเส้นแนวฉาก ส่วนรังสีของแสงที่เข้าไปในตัวกลางใหม่ เรียกว่า **รังสีหักเห** (refracted ray) ซึ่งในที่นี้ทำมุมหักเห θ_2 กับเส้นแนวฉาก



รูป 11.6 แผนภาพรังสีแสดงการหักเหของแสง

ดรรชนีหักเหและกฎของสเนลล์

การหักเหของแสงก็เป็นเช่นเดียวกับการหักเหของคลื่นชนิดอื่น คือ เป็นผลโดยตรงจากการที่อัตราเร็วของคลื่นในตัวกลางแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ซึ่งสำหรับเรื่องของแสงนั้น เรามักจะพูดถึงอัตราเร็วของแสงในตัวกลางต่าง ๆ ในรูปของ **ดรรชนีหักเห** (index of refraction, n) ของตัวกลาง ซึ่งเท่ากับอัตราส่วนของอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศกับอัตราเร็วของแสงในตัวกลางนั้น ๆ นั่นคือ

$$n = \frac{c}{v}$$

โดยที่ n คือ ดรรชนีหักเหของตัวกลาง

c คือ อัตราเร็วของแสงในสุญญากาศซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.9979×10^8 เมตรต่อวินาที หรือประมาณ 3.0×10^8 เมตรต่อวินาที

v คือ อัตราเร็วของแสงในตัวกลาง

ดรรชนีหักเหของสารต่าง ๆ คิดจากอัตราส่วนของอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศกับอัตราเร็วของแสงในตัวกลาง ทำให้ดรรชนีหักเหเป็นปริมาณที่ไม่มีหน่วย โดยค่าดรรชนีหักเหของสารชนิดต่าง ๆ สำหรับแสงที่ความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแสงสีเหลืองจากหลอดโซเดียม (แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้กันมากในยุคแรก ๆ ที่ศึกษาเรื่องดรรชนีหักเห) แสดงดังตาราง 11.1

ตาราง 11.1 ดรรชนีหักเหของสารชนิดต่าง ๆ สำหรับความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร

ของแข็งที่อุณหภูมิ 20 °C		**ของเหลวที่อุณหภูมิ 20 °C**		**แก๊สที่อุณหภูมิ 20 °C ความดัน 1 บรรยากาศ**	
สสาร	ดรรชนีหักเห	สสาร	ดรรชนีหักเห	สสาร	ดรรชนีหักเห
น้ำแข็ง	1.309	น้ำ	1.333	อากาศ	1.000293
ฟลูออไรต์	1.434	กลีเซอรีน	1.473	คาร์บอนไดออกไซด์	1.00045
ซิลิกา	1.458	เอทิลอัลกอฮอล์	1.361		
แก้วคราวน์	1.52	คาร์บอนไดซัลไฟด์	1.628		
โซเดียมคลอไรด์	1.544	เบนซีน	1.501		
แก้วฟลินท์	1.66				

จากตาราง 11.1 พบว่า แก้วคราวน์มีดรรชนีหักเห 1.52 แสดงว่าเมื่อแสงเดินทางในแก้วนี้อัตราเร็วของแสงลดลงเหลือประมาณ $v = \frac{c}{n} = \frac{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.52} = 1.97 \times 10^8 \text{ m/s}$

แสงเดินทางในอากาศด้วยอัตราเร็ว 2.9970×10^8 เมตรต่อวินาที ซึ่งเกือบเท่ากับอัตราเร็วของแสงเมื่อเดินทางผ่านสุญญากาศ เพราะดรรชนีหักเหในอากาศมีค่า 1.000293 ในระดับมัธยมนี้มักจะกำหนดให้ดรรชนีหักเหของอากาศมีค่าเท่ากับ 1.000 และเท่ากับดรรชนีหักเหของสุญญากาศ

นอกจากนี้ ดรรชนีหักเหสำหรับตัวกลางหนึ่ง ๆ ยังมีค่าขึ้นกับความยาวคลื่นของแสงด้วย เช่น แก้วคราวน์ซึ่งนิยมมาใช้ทำเลนส์ มีดรรชนีหักเหที่ความยาวคลื่นแสง 400 นาโนเมตร (สีม่วง) เท่ากับ 1.53 ในขณะที่ดรรชนีหักเหของแก้วเดียวกันเมื่อความยาวคลื่นแสงเป็น 660 นาโนเมตร (สีแดง) จะมีค่าเพียง 1.51 ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะโมเลกุลของเนื้อสารจะมีการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน

การเคลื่อนที่ของแสงผ่านผิวรอยต่อของตัวกลางสองตัวกลางจะเกิดการหักเหของแสง โดยแสงมีการเปลี่ยนอัตราเร็ว นอกจากนี้ ถ้ารังสีตกกระทบที่ผิวรอยต่อไม่ตั้งฉากกับผิวรอยต่อของตัวกลางทั้งสอง รังสีหักเหจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่โดยมุมของรังสีตกกระทบและมุมของรังสีหักเหมีความสัมพันธ์กันอย่างไรนั้น ศึกษาได้จากกิจกรรม 11.2 การหักเหของแสง

กิจกรรม 11.2 การหักเหของแสง

จุดประสงค์

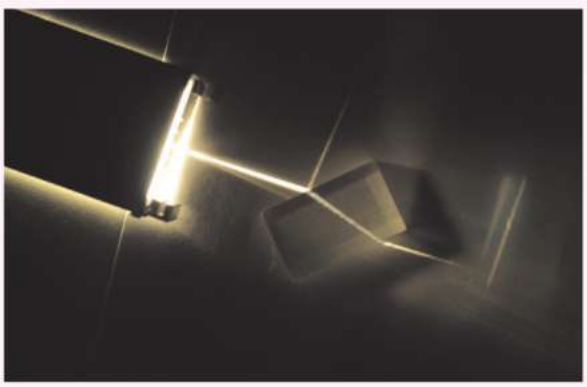
สังเกตและอธิบายการหักเหของแสง

วัสดุอุปกรณ์

1. ชุดกล่องแสง	1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำขนาด 12 โวลต์	1 เครื่อง
3. แท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมผืนผ้า	1 แท่ง
4. ครึ่งวงกลมวัดมุม	1 อัน
5. กระดาษขาว	1 แผ่น

วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อสายไฟจากกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงโวลต์ต่ำ 12 โวลต์ ใส่แผ่นช่องแสงที่ให้ลำแสง 1 ลำ เข้ากับกล่องแสง
2. วางแท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมผืนผ้าหน้ากล่องแสงโดยให้ด้านขุ่นทาบกับกระดาษขาว จัดลำแสงให้ทำมุมตกกระทบค่าหนึ่งที่ผิวด้านข้างของแท่งพลาสติก



รูป การจัดอุปกรณ์เพื่อศึกษาการหักเหของแสง

3. สังเกตแสงที่หักเหในแท่งพลาสติก จากนั้นลากเส้นดินสอตามขอบของแท่งพลาสติกทั้งสี่ด้านบนกระดาษขาว ลากรังสีตกกระทบและรังสีหักเหในแท่งพลาสติก รวมทั้งรังสีหักเหที่เคลื่อนที่ออกจากแท่งพลาสติกสู่อากาศ
4. วัดมุมตกกระทบในอากาศ θ_1 มุมหักเหในแท่งพลาสติก θ_2 มุมตกกระทบในแท่งพลาสติก θ_3 และมุมหักเหในอากาศ θ_4 แล้วบันทึกผลลงในตาราง
5. ทำซ้ำข้อ 2 – ข้อ 4 โดยเปลี่ยนมุม θ_1 อีก 2 ค่า แล้ววัดมุม θ_2 θ_3 และ θ_4 บันทึกผลลงในตาราง จากนั้นหาค่าของ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ และ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ บันทึกผลลงในตาราง

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ ค่าของ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ และ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ ที่ได้ทั้งสามครั้ง เท่ากันหรือไม่

☐ ค่าของ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ แตกต่างจาก $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ อย่างไร

จากกิจกรรม 11.2 พบว่า แสงมีการหักเหเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่ง โดยแสงเคลื่อนที่จากอากาศเข้าสู่แท่งพลาสติก มุมหักเหจะเล็กกว่ามุมตกกระทบ และอัตราส่วนระหว่างไซน์ของมุมตกกระทบกับไซน์ของมุมหักเหมีค่าคงตัวค่าหนึ่ง นั่นคือ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ มีค่าคงตัว ในขณะที่เมื่อแสงเคลื่อนที่จากแท่งพลาสติกเข้าสู่อากาศ มุมหักเหจะโตกว่ามุมตกกระทบ โดยอัตราส่วนระหว่างไซน์ของมุมตกกระทบกับไซน์ของมุมหักเหยังมีค่าคงตัวค่าหนึ่ง นั่นคือ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$ มีค่าคงตัว ทั้งนี้ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$ เป็นส่วนกลับของ $\frac{\sin\theta_3}{\sin\theta_4}$

จากความรู้เรื่องการหักเหของคลื่น จะได้

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{v_1}{v_2} \qquad (11.1)$$

โดยที่ $n_1=\frac{c}{v_1}$ หรือ $v_1=\frac{c}{n_1}$

และ $n_2=\frac{c}{v_2}$ หรือ $v_1=\frac{c}{n_1}$

แทนค่าใน (11.1) จะได้ $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}=\frac{c/n_1}{c/n_2}$

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

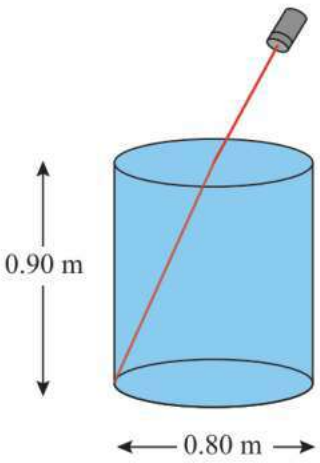
$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad (11.2)$$

ความสัมพันธ์ตามสมการ (11.2) เรียกว่า กฎของสเนลล์ (Snell's law)

จากการทำกิจกรรม 11.2 และข้อมูลเกี่ยวการหักเหของแสงที่กล่าวข้างต้น สามารถสรุปเป็น **กฎการหักเห** (law of refraction) ได้ว่า

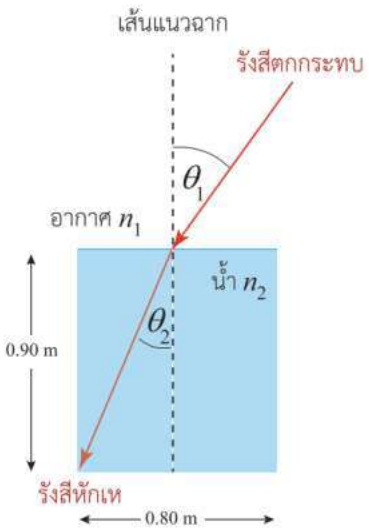
1. $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
2. รังสีตกกระทบ รังสีหักเห และเส้นแนวฉากจะอยู่ในระนาบเดียวกัน

ตัวอย่าง 11.2 ฉายแสงเลเซอร์ลงไปตรงกลางถังน้ำรูปทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.80 เมตร สูง 0.90 เมตร บรรจุน้ำเต็มถัง ถ้าต้องการให้แสงเลเซอร์ฉายลงไปตรงมุมถังพอดี จะต้องฉายแสงเลเซอร์ด้วยมุมตกกระทบเท่าใด กำหนดให้ดรรชนีหักเหของน้ำเท่ากับ 1.33



รูป ประกอบตัวอย่าง 11.2

แนวคิด แสงเดินทางจากอากาศไปน้ำซึ่งเป็นตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหมากกว่า แนวรังสีเบนไปจากแนวเดิม ดังรูป



รูป ประกอบแนวคิดสำหรับตัวอย่าง 11.2

หามุมตกกระทบ θ_1 ได้จากกฎของสเนลล์

วิธีทำ หา $\sin\theta_2$ จากฟังก์ชันตรีโกณมิติ

จะได้ $$\sin\theta_2 = \frac{0.40\ \text{m}}{\sqrt{(0.40\ \text{m})^2 + (0.90\ \text{m})^2}}$$

$$= 0.406 \text{ (คำนวณเป็นมุม } \theta_2 = 24.0^\circ)$$

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

แทนค่า $$(1.00)\sin\theta_1 = (1.33)(0.406)$$

แทนค่า $$\sin\theta_1 = 0.540$$

$$\theta_1 = \arcsin(0.540)$$

$$= 32.7^\circ$$

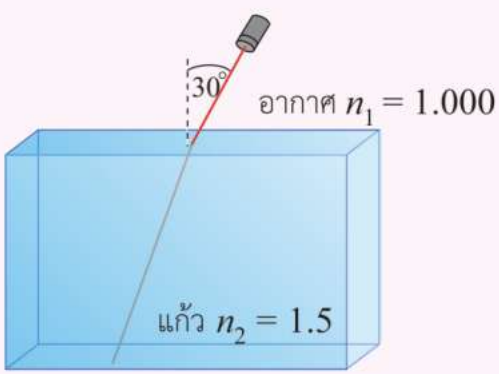
ตอบ ต้องฉายแสงเลเซอร์ด้วยมุมตกกระทบ 32.7 องศา

ข้อสังเกต

จะเห็นว่า ในกรณีที่แสงเดินทางจากอากาศสู่น้ำ รังสีของแสงจะเบนเข้าหาเส้นแนวฉาก (มุมหักเหมีค่าน้อยกว่ามุมตกกระทบ)

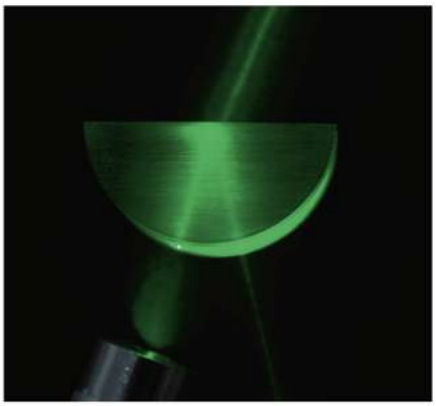
ชวนคิด

ถ้าแสงตกกระทบแท่งแก้วที่มีดรรชนีหักเห 1.5 ที่มีความหนาสม่ำเสมอ ด้วยมุมตกกระทบ 30° ดังรูป แสงจะหักเหออกจากแท่งแก้วด้วยมุมหักเหเท่าใด กำหนดให้แท่งแก้วนี้วางอยู่ในอากาศที่มีดรรชนีหักเห 1.000

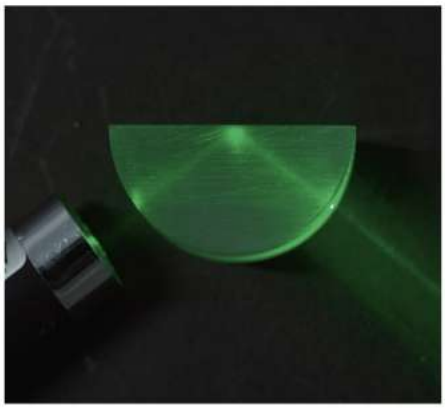


การสะท้อนกลับหมด

โดยทั่วไปแล้วเมื่อแสงเดินทางจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง แสงที่ตกกระทบส่วนหนึ่งจะเกิดการสะท้อนและอีกส่วนหนึ่งจะเกิดการหักเห ดังรูป 11.7 ก. แต่มีบางกรณีที่เมื่อแสงเดินทางมาถึงรอยต่อระหว่างตัวกลางเช่นระหว่างแก้วกับอากาศ พบว่าไม่มีแสงหักเหออกมาสู่อากาศเลย มีแต่แสงส่วนที่สะท้อนในแก้วเท่านั้น ดังรูป 11.7 ข. ปรากฏการณ์เช่นนี้ เรียกว่า **การสะท้อนกลับหมด** (total internal reflection)



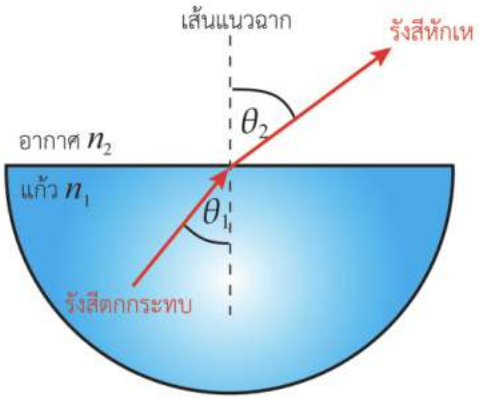
ก. แสงเกิดการสะท้อนและเกิดการหักเห



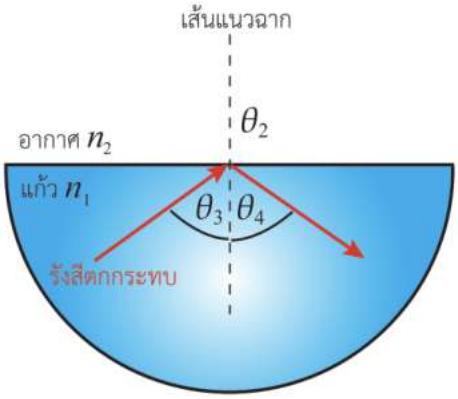
ข. แสงเกิดการสะท้อนกลับหมด

รูป 11.7 การเดินทางของแสงจากตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหมากไปตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหน้อย

ปรากฏการณ์การสะท้อนกลับหมดสามารถอธิบายได้ โดยพิจารณาจาก ในกรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหมากไปยังตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหน้อย เช่น จากแก้วไปยังอากาศ จะทำให้รังสีหักเหเบนออกจากเส้นแนวฉาก โดยมุมหักเหจะโตกว่ามุมตกกระทบ ดังรูป 11.8



ก. มุมหักเหมีขนาดโตกว่ามุมตกกระทบ



ข. มุมตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้นจนเกิดการสะท้อนกลับหมด

รูป 11.8 แผนภาพรังสีของแสงที่เดินทางจากตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหมากไปตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหน้อย

เมื่อมุมตกกระทบมีค่าเพิ่มขึ้น จะพบว่ามีมุมตกกระทบมุมหนึ่งที่ทำให้มุมหักเหเป็นมุม 90° พอดี เรียกมุมตกกระทบนี้ว่า **มุมวิกฤต** (critical angle, θ_c) ซึ่งเป็นมุมที่ใช้ในการพิจารณาการสะท้อนกลับหมด ในกรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลาง n_1 ไปยังตัวกลางที่มีดรรชนีหักเห n_2 โดยที่ $n_1 > n_2$ เราจะสามารถหามุมวิกฤตได้ดังนี้

จากสมการ (11.2) $$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$$

แทนค่า จะได้ $$n_1(\sin\theta_c) = n_2(\sin 90^\circ)$$

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

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \qquad (11.3)$$

สังเกตว่า (11.3) จะเป็นจริงได้ในกรณีที่ $n_1 > n_2$ เท่านั้น เพราะค่า sine ไม่สามารถมีค่าเกินหนึ่งได้ และเราสนใจกรณีที่มีการเปลี่ยนตัวกลางเท่านั้น นั่นคือ จะไม่พิจารณากรณีที่ $n_1 = n_2$ ดังนั้นการสะท้อนกลับหมดจะเกิดขึ้นเมื่อมุมตกกระทบโตกว่ามุมวิกฤตเฉพาะกรณีที่แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหมากกว่าไปยังผิวรอยต่อของตัวกลางที่มีดรรรชนีหักเหน้อยกว่าเท่านั้น เช่น การที่แสงเดินทางจากในน้ำ (ดรรชนีหักเห 1.33) มายังผิวรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ (ดรรชนีหักเห 1.00)

ตัวอย่าง 11.3 จงหามุมวิกฤตสำหรับการสะท้อนกลับหมดในแก้วที่รอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศ กำหนดให้ดรรชนีหักเหของแก้วเท่ากับ 1.50 และดรรชนีหักเหของอากาศเท่ากับ 1.00

แนวคิด หามุมวิกฤตจากกฎของสเนลล์โดยพิจารณามุมหักเหมีค่าเท่ากับ 90 องศา

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

แทนค่า $$(1.50)(\sin\theta_c) = (1.00)(\sin 90^\circ)$$

จะได้ $$\sin\theta_c = \frac{1.00}{1.50}$$

$$\theta_c = \arcsin(0.667)$$

$$\theta_c = 41.8^\circ$$

ตอบ มุมวิกฤตสำหรับการสะท้อนกลับหมดเท่ากับ 41.8 องศา

จากตัวอย่าง 11.3 มุมวิกฤตระหว่างแก้วกับอากาศที่มีค่า $\theta_c = 41.8^\circ$ แสดงว่า ถ้าแสงเดินทางภายในแก้วไปถึงผิวรอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศด้วยมุมตกกระทบที่โตกว่า $\theta_c = 41.8^\circ$ จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมด ซึ่งข้อมูลนี้อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปที่ 11.8 ข. โดยแสงเดินทางภายในแก้วด้วยมุมตกกระทบประมาณ 60° ซึ่งโตกว่ามุมวิกฤต จึงไม่มีรังสีหักเหออกไปจากแก้วเลย

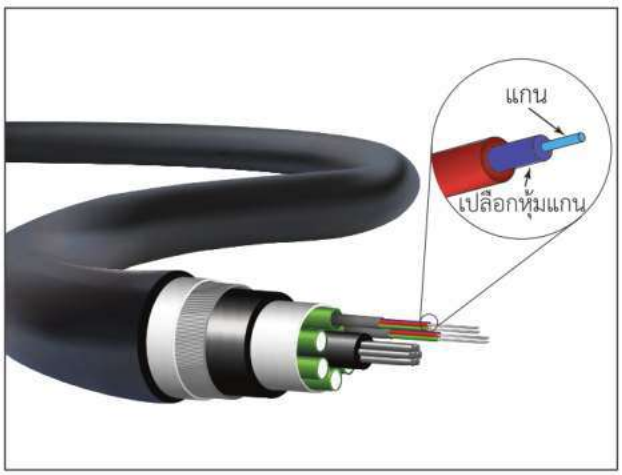
ชวนคิด

ถ้าแก้ววางอยู่ในน้ำแทนที่จะเป็นอากาศ มุมวิกฤตสำหรับการสะท้อนกลับหมดในแก้วที่รอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศจะเท่ากับ 41.8° หรือไม่

หลักการเรื่องการสะท้อนกลับหมดถูกประยุกต์ใช้งานในหลายเรื่อง เช่น การใช้ประโยชน์จาก**เส้นใยนำแสง** (optical fibers) ซึ่งเป็นแก้วรูปทรงกระบอกตันขนาดเล็ก มีสมบัติคือ สามารถทำให้แสงเดินทางไปตามเส้นใยนำแสงได้ด้วยการสะท้อนกลับหมดที่ด้านข้างของเส้นใย ดังรูปที่ 11.9 ในความจริงแล้วเส้นใยนำแสงนี้อาจทำจากวัสดุอื่นนอกจากแก้วก็ได้ เช่น พลาสติก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน เส้นใยนำแสงชนิดที่ใช้ในการส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตข้ามทวีปจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเพียง 50 ไมโครเมตร และมีความยาวได้หลายร้อยกิโลเมตร ซึ่งอัตราเร็วแสงในเส้นใยนำแสงมีค่าประมาณ 2.0×10^{8} เมตรต่อวินาที ทำให้แสงใช้เวลาเดินทางในเส้นใยนำแสงระหว่างกรุงเทพและสหรัฐอเมริกาเพียง 0.09 วินาที เท่านั้น

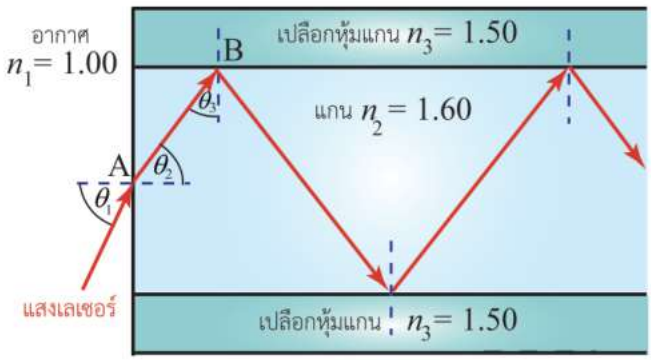
รูป 11.9 แสงที่เดินทางภายในเส้นใยนำแสง

เส้นใยนำแสงที่ใช้ในการสื่อสารไม่ได้ใช้การสะท้อนกลับหมดที่เกิดขึ้นที่ผิวรอยต่อระหว่างแก้วกับอากาศ แต่จะใช้ผิวรอยต่อระหว่างแก้วสองชนิดที่ใช้ทำเส้นใยนำแสง โดยเส้นใยนำแสงจะประกอบด้วยเนื้อแก้วสองชั้นที่เป็นสารคนละชนิดกัน และแก้วทั้งสองมีดรรชนีหักเหไม่เท่ากัน ดังรูป 11.10 แก้วส่วนชั้นในเรียกว่า **แกน** (core) ส่วนชั้นนอกเรียกว่า **เปลือกหุ้มแกน** (cladding) โดยเงื่อนไขที่จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดคือ ส่วนที่เป็นแกนจะต้องมีดรรชนีหักเหสูงกว่าส่วนที่เป็นเปลือกหุ้มแกน



รูป 11.10 เส้นใยนำแสง

ตัวอย่าง 11.4 ถ้าต้องการส่งแสงเลเซอร์เข้าไปในเส้นใยนำแสงที่ประกอบด้วยแกนที่มีดรรชนีหักเห $n_2 = 1.60$ และเปลือกหุ้มแกนที่มีดรรชนีหักเห $n_3 = 1.50$ ดังรูป



รูปประกอบตัวอย่าง 11.4

จะต้องยิงแสงเลเซอร์เข้าไปที่จุด A ด้วยมุมตกกระทบที่น้อยกว่ากี่องศา

แนวคิด ในการส่งแสงเลเซอร์เข้าไปในเส้นใยนำแสง แสงจะเกิดการหักเหจากการเคลื่อนที่จากอากาศเข้าสู่ส่วนแกนของเส้นใยนำแสงที่จุด A โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

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

เมื่อแสงเคลื่อนที่เข้าไปในเส้นใยนำแสง จะต้องทำมุมที่เหมาะสมเพื่อทำให้เกิดการสะท้อนกลับหมดที่รอยต่อระหว่างส่วนแกนและเปลือกหุ้มแกนในเส้นใยนำแสงที่จุด B โดยหามุมวิกฤตได้จากสมการ

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

วิธีทำ หามุมวิกฤตระหว่างแกนกับเปลือกหุ้มแกนที่จุด B ได้จาก

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

แทนค่า จะได้

$$\sin\theta_c = \frac{1.50}{1.60}$$

$$= 0.938$$

นั่นคือ

$$\theta_c = \arcsin(0.938)$$

$$= 69.7^\circ$$

แสดงว่า ต้องให้มุมตกกระทบที่จุด B มีค่าอย่างน้อย 69.7° แต่โจทย์ต้องการทราบมุมตกกระทบจากอากาศเข้าไปยังแก้วที่จุด A ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปจะเห็นว่า มุมหักเหที่จุด A จะต้องมีค่าน้อยกว่า $90^\circ - 69.7^\circ = 20.3^\circ$

พิจารณาการหักเหที่จุด A จะได้ว่า

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

แทนค่า $$(1.00)(\sin\theta_1) = (1.60)(\sin 20.3^\circ)$$

$$\sin\theta_1 = 0.555$$

$$\theta_1 = 33.7^\circ$$

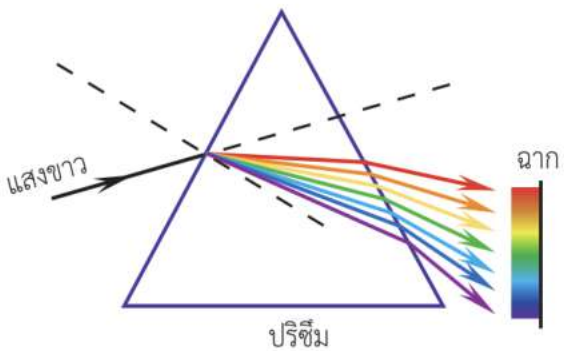
จะได้ว่า ถ้ามุมตกกระทบที่จุด A มีค่าเท่ากับ 33.7° จะทำให้แสงที่เข้าไปในเส้นใยนำแสงเกิดการหักเหระหว่างส่วนแกนและส่วนเปลือกหุ้มแกนด้วยมุมหักเห 90° พอดี ดังนั้น ถ้าต้องการให้เกิดการสะท้อนกลับหมด มุมตกกระทบที่จุด A จะต้องมีค่า "น้อยกว่า" 33.7°

ตอบ มุมตกกระทบที่จุด A จะต้องมีค่าน้อยกว่า 33.7 องศา

การกระจายแสง

เมื่อให้แสงขาวผ่านปริซึม จะพบว่า แสงที่หักเหออกจากปริซึมจะไม่เป็นแสงขาว แต่จะมีแสงสีต่าง ๆ ปรากฏบนฉาก ดังรูป 11.11 ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า **การกระจายแสง** (dispersion of light)

ก. แสงขาวผ่านปริซึม



ข. แผนภาพรังสีของแสงขาวผ่านปริซึม

รูป 11.11 การกระจายแสงเมื่อแสงขาวหักเหผ่านปริซึม

ปรากฏการณ์การกระจายแสงเกิดขึ้นเนื่องจากแสงขาวประกอบด้วยแสงหลายสีและดรรชนีหักเหของแก้วสำหรับแสงแต่ละสีไม่เท่ากัน ทำให้เมื่อรังสีแสงขาวผ่านปริซึมที่ทำจากแก้วคราวน์ ซึ่งแสงสีทุกสีตกกระทบปริซึมด้วยมุมตกกระทบเท่ากัน เกิดการหักเหด้วยมุมที่ไม่เท่ากัน แสงสีแต่ละสีจึงแยกออกจากกัน เช่น ถ้าแสงขาวจากอากาศตกกระทบด้วยมุมตกกระทบ 30.0 องศา แสงสีม่วงจะมีมุมหักเหในปริซึม เท่ากับ 19.1 องศา แสงสีแดงจะมีมุมหักเหในปริซึมเท่ากับ 19.3 องศา เป็นต้น

ความรู้เพิ่มเติม

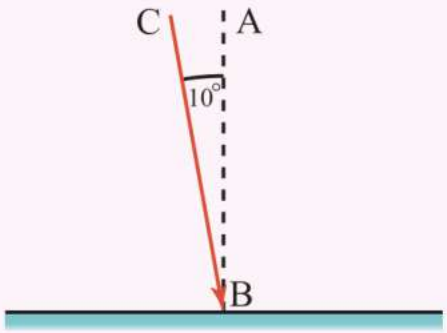
นอกจาก ไอแซก นิวตัน (Isaac Newton ค.ศ. 1642 - 1727) จะเป็นผู้วางรากฐานที่สำคัญของวิชาฟิสิกส์ด้านกลศาสตร์แล้ว ผลงานของเขายังมีความโดดเด่นในวิชาฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับแสงด้วยโดยหนึ่งในผลงานที่สำคัญของเขา คือ การค้นพบแถบแสงหลายสีจากการฉายแสงขาวจากดวงอาทิตย์ผ่านปริซึม นอกจากนี้เขายังพบว่า ถ้านำแถบแสงหลายสีดังกล่าวมารวมกันด้วยเลนส์กับปริซึมอีกแท่งหนึ่งจะเกิดเป็นแสงขาวอีกครั้ง นิวตันได้เรียกแถบสีที่เกิดจากการแยกแสงขาวว่า **สเปกตรัม** (spectrum) การค้นพบดังกล่าวทำให้เกิดการเปลี่ยนมุมมองของแสงจากความเชื่อว่า แสงขาวเป็นแสงบริสุทธิ์ กลายเป็น แสงขาวเกิดจากการผสมกันระหว่างแสงสีอื่น ๆ และทำให้นิวตันสร้างกล้องโทรทรรศน์ที่อาศัยหลักการสะท้อนของแสงแทนการหักเหของแสงเพื่อการลดปัญหาการเกิดภาพที่ไม่คมชัดและมีสีที่คลาดเคลื่อนได้สำเร็จ

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 11.1

1. การสะท้อนของแสงเกิดอย่างไร
2. การหักเหของแสงเกิดอย่างไร
3. เพราะเหตุใดแสงเลเซอร์ที่เคลื่อนที่จากอากาศไปยังแท่งแก้วและน้ำด้วยมุมตกกระทบที่เท่ากันจึงมีมุมหักเหที่ต่างกัน
4. เพราะเหตุใดเมื่อให้แสงขาวเคลื่อนที่ผ่านปริซึมจึงเกิดเป็นแถบแสงหลายสี

แบบฝึกหัด 11.1

1. รังสีของแสง CB ตกกระทบกระจกเงาราบทำมุม 10 องศา กับเส้น AB ซึ่งอยู่ในแนวตั้งฉากกับกระจก ดังรูป



รูป ประกอบแบบฝึกหัด 11.1 ข้อ 1

เมื่อบิดกระจกเงาราบทำมุม 10 องศา กับแนวเดิมของกระจกเงาราบ รังสีสะท้อนจะทำมุมเท่าใดกับเส้น AB ถ้า

ก. บิดกระจกเงาราบในทิศทางทวนเข็มนาฬิการอบจุด B

ข. บิดกระจกเงาราบในทิศทางตามเข็มนาฬิการอบจุด B

2. แสงความยาวคลื่น 589 นาโนเมตร เดินทางจากสุญญากาศเข้าสู่ซิลิกาโดยมีอัตราเร็วของแสงในซิลิกาเป็น 2.06×10^{8} เมตรต่อวินาที ดรรชนีหักเหของซิลิกาเป็นเท่าใด กำหนดอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศเท่ากับ 3.00×10^{8} เมตรต่อวินาที
3. แสงเดินทางออกจากแก้วคราวน์สู่อากาศทำมุมตกกระทบ 30 องศา ที่ผิวรอยต่อระหว่างแก้วคราวน์กับอากาศ แสงจะมีมุมหักเหเป็นเท่าใด กำหนดดรรชนีหักเหของอากาศและแก้วคราวน์เท่ากับ 1.00 และ 1.52 ตามลำดับ
4. จงหามุมวิกฤตของเพชรเมื่อแสงผ่านจากเพชรไปยังน้ำ กำหนดดรรชนีหักเหของเพชรและน้ำเท่ากับ 2.42 และ 1.33 ตามลำดับ

11.2 การมองเห็นและการเกิดภาพ

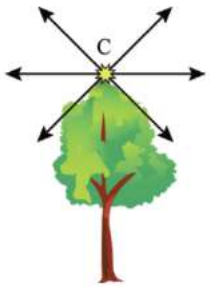
11.2.1 การมองเห็น

ในการอธิบายการมองเห็นภาพ อาจเริ่มต้นด้วยหลักการพื้นฐานของการมองเห็นว่า เราจะมองเห็นวัตถุใดได้จะต้องมีแสงจากวัตถุนั้นมาเข้าตาเรา ซึ่งวัตถุนั้นอาจจะเป็นวัตถุที่มีแสงในตัวเองหรือวัตถุนั้นสะท้อนแสงจากแหล่งกำเนิดอื่นมาเข้าตาเราก็ได้ ตัวอย่างเช่น การมองเห็นต้นไม้ต้นหนึ่ง อาจเริ่มต้นด้วยการพิจารณาตำแหน่งเดียวบนต้นไม้ คือส่วนยอดสุดของต้นไม้เท่านั้น โดยกำหนดให้เรียกเป็นจุด C ถ้าเรามองเห็นจุด C ได้ แสดงว่ามีแสงจากจุด C มาเข้าตาเรา และถ้าเราขยับตัวไปด้านข้าง เราก็ยังคงมองเห็นจุด C ได้ แสดงว่าแสงที่ออกจากจุด C นั้นไม่ได้มีเพียงทิศทางใดทิศทางหนึ่ง แต่จะออกได้ทุกทิศทาง และเราแสดงการที่แสงออกจากจุด C ในทุกทิศทางนี้ด้วยรังสีของแสงที่ชี้ออกในทุกทิศทาง ดังรูป 11.12 ก.

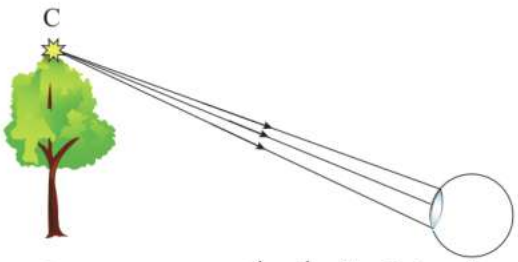
หากพิจาณาเฉพาะรังสีของแสงที่มาเข้าตาเราเท่านั้น อาจเขียนรังสีของแสงออกจากจุด C ด้วยรังสีเพียงไม่กี่เส้น ซึ่งในที่นี้คือ 3 เส้น ดังรูป 11.12 ข.

แต่การมองเห็นของมนุษย์เราไม่ได้เห็นเฉพาะจุด C เท่านั้น เรายังเห็นส่วนอื่นๆ ของต้นไม้ด้วย แสดงว่ามีแสงจากส่วนอื่น เช่น กิ่งด้านล่าง หรือโคนต้นไม้ ออกมาเข้าตาเราได้อีกด้วย ดังรูป 11.12 ค.

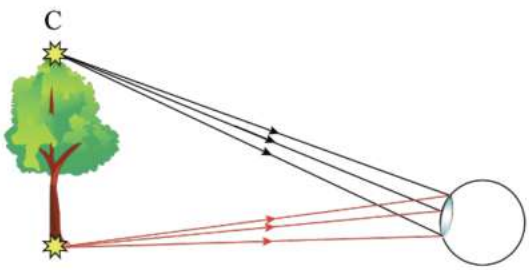
การที่ตาของเราสามารถแยกได้แสงมาจากส่วนไหนของต้นไม้ เนื่องจากแสงจากแต่ละจุดบนวัตถุที่มาเข้าตาเรานั้นเป็นแสงที่บานออก เมื่อรังสีของแสงบางส่วนเข้าตาเรา เลนส์ตาจะทำหน้าที่ช่วยให้แสงเหล่านี้ไปตกกระทบบน**จอตา** (retina) โดยแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแสงแต่ละจุดจะไปตกกระทบที่จอตาในตำแหน่งที่ต่างกัน ดังรูป 11.12 ง. การรับรู้บนจอตาจะส่งสัญญาณให้สมองแปลความหมายจนทำให้เราเห็นต้นไม้ได้



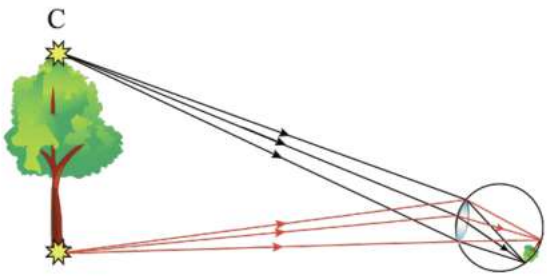
ก.แสงที่ออกจากยอดต้นไม้ทุกทิศทาง



ข. พิจารณาเฉพาะแสงที่มาที่ตาด้วยรังสี 3 เส้น



ค. พิจารณาแสงจากจุดอื่น ๆ ของต้นไม้ที่มาที่ตา



ง. การเกิดภาพบนจอตา

รูป 11.12 การอธิบายการมองเห็นต้นไม้

11.2.2 การเกิดภาพ

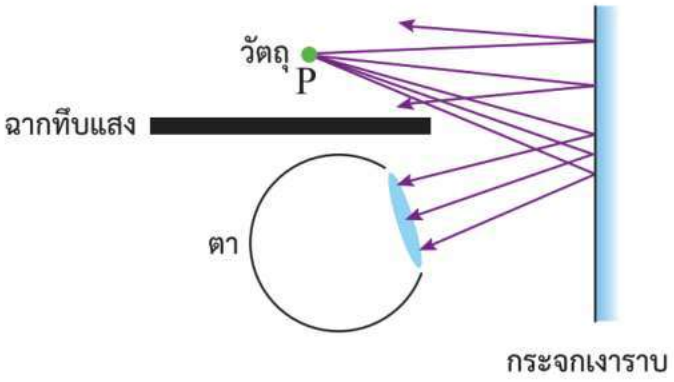
เราได้เรียนรู้การมองเห็นซึ่งเกิดจากการที่แสงจากวัตถุเข้าสู่ตาเราทำให้สมองแปลความหมายให้สามารถมองเห็นวัตถุนั้น ๆ ได้ ในกรณีที่แสงเข้าสู่ตาเราเป็นแสงที่มาจากการสะท้อนหรือการหักเหของแสง จะทำให้เรามองเห็นวัตถุเป็นอย่างไร

ภาพที่เกิดจากการสะท้อน

ในการส่องกระจกเงาราบซึ่งเป็นวัตถุที่สามารถสะท้อนแสงได้ดี เราจะเห็นตัวเราอยู่ในกระจกได้ ทั้ง ๆ ที่เราไม่ได้อยู่ในกระจก เราเรียกสิ่งที่มองเห็นว่า **ภาพ** (image) ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อมีบางสิ่งมาเปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงที่ออกจากวัตถุมาเข้าตาเรา ทำให้เราเห็นภาพตรงตำแหน่งที่แนวรังสีที่เข้าตาเราตัดกัน แม้เราอาจไม่พบวัตถุจริง ณ ตำแหน่งที่เรามองเห็นภาพ

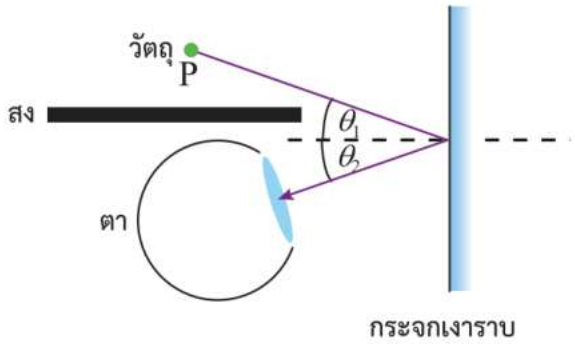
รูป 11.13 การส่องกระจกเงาราบ

พิจารณารูป 11.14 การมองเห็นภาพจากการสะท้อนโดยมีวัตถุตั้งอยู่หน้ากระจกที่จุด P และในขณะที่ผู้สังเกตมองวัตถุผ่านกระจกโดยมีฉากทึบแสงกั้นระหว่างวัตถุกับผู้สังเกต เมื่อแสงตกกระทบวัตถุทำให้มีแสงออกจากวัตถุในทุกทิศทุกทาง เราเขียนแทนด้วยรังสีหลายเส้น



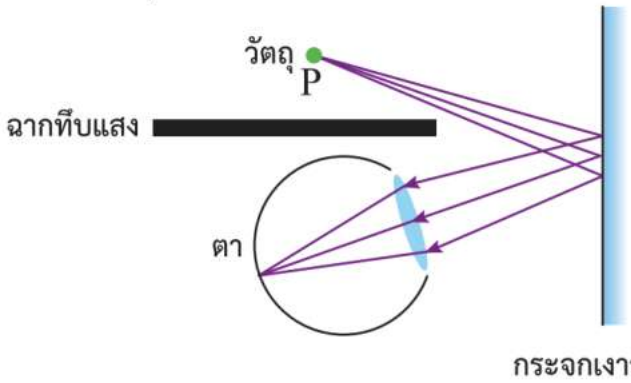
รูป 11.14 รังสีที่ออกจากจุด P ไปสะท้อนกระจก

ฉากทึบแสงที่กั้นระหว่างตากับวัตถุ ทำให้ไม่มีรังสีมาถึงตาเราได้โดยตรง แต่รังสีที่สะท้อนกระจกสามารถมาถึงตาเราได้ ถ้าพิจารณารังสีส่วนที่ไปตกกระทบกระจกจะพบว่า มุมตกกระทบของรังสีแต่ละเส้นมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้เกิดรังสีสะท้อนในทิศทางต่าง ๆ กัน โดยรังสีสะท้อนแต่ละเส้นจะเป็นไปตามกฎการสะท้อน ดังรูป 11.15



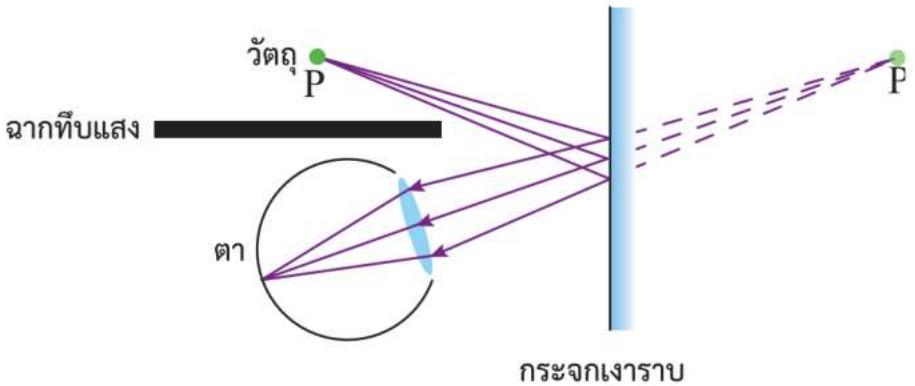
รูป 11.15 การสะท้อนของรังสีแต่ละเส้นเป็นไปตามกฎการสะท้อน

สำหรับการมองเห็นภาพจากการสะท้อน เราจะเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนของรังสีที่มาเข้าตาและเขียนแทนด้วยรังสีเพียงสามเส้น ดังรูป 11.16 สังเกตว่ารังสีทั้งสามที่มาเข้าตาเรานั้นจะบานออก เนื่องจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นจุด



รูป 11.16 รังสีที่สะท้อนก็ยังคงบานออก และไปเข้าตาเรา

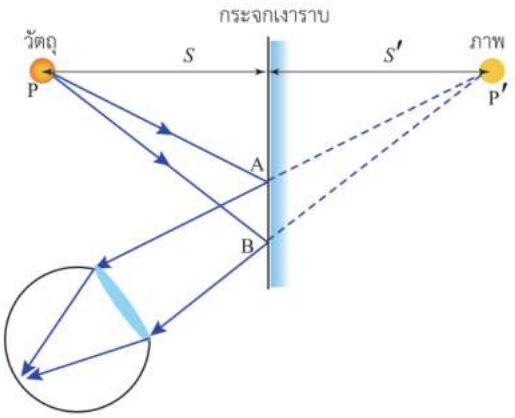
ถ้ามีรังสีของแสงจากวัตถุ P สะท้อนจากกระจกมาเข้าตาเรา ตาและสมองของเราก็จะบอกว่า แสงทั้งหมดที่มาเข้าตาเรานั้น เสมือนออกมาจากจุด P′ ดังรูป 11.17 ถ้าเราไม่สังเกตเห็นกระจกเงาเลย เราก็จะบอกว่า มีวัตถุอยู่ที่ตำแหน่ง P′ เหมือนที่หลายคนอาจจะเห็นภาพในกระจกแล้วนึกว่าเป็นวัตถุจริง ๆ แต่ถ้าเรารู้ว่ามีกระจกอยู่ตรงหน้า และเข้าใจอยู่แล้วว่าสิ่งที่เราเห็นนั้นไม่ใช่วัตถุแน่ ๆ เราก็จะบอกว่า มีภาพอยู่ที่ตำแหน่ง P′ และเราเรียกกระบวนการทั้งหมดนี้ว่า **การเกิดภาพ** (image formation)



รูป 11.17 ตาและสมองจะย้อนแนวรังสีที่มาเข้าตา และบอกว่ารังสีนี้ออกจากจุด P′

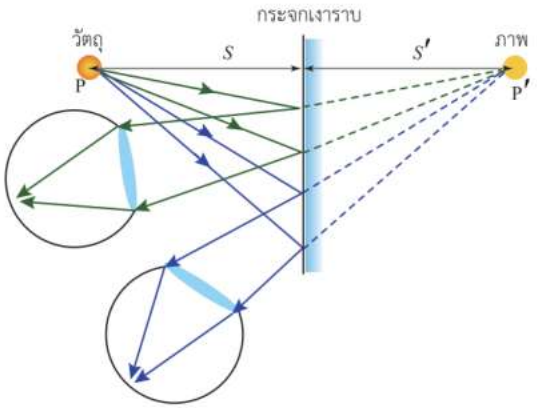
เราสามารถแสดงได้ว่า ตำแหน่งของภาพบนกระจกเงาราบนั้นอยู่อย่างสมมาตรกับตำแหน่งของวัตถุ คืออยู่ตรงข้ามกันแต่อยู่คนละด้านของกระจก โดยระยะทางระหว่างตำแหน่งของภาพกับกระจกนั้นเท่ากับระยะทางระหว่างตำแหน่งของวัตถุกับกระจก โดยเริ่มจากการเขียนรูปด้วยใช้รังสีเพียงสองเส้นเพื่อไม่ทำให้รูปดูซับซ้อนเกินไป และยังคงหาตำแหน่งของภาพได้ ดังรูป 11.18 ซึ่งจะพบว่า สามเหลี่ยม PAB และสามเหลี่ยม P′AB เป็นสามเหลี่ยมที่เท่ากันทุกประการ เพราะมีระยะ AB ที่เท่ากันเนื่องจากเป็นเส้นตรงเดียวกัน มุม $P\hat{A}B$ เท่ากับมุม $P'\hat{A}B$ ด้วยสมบัติมุมตกกระทบที่เท่ากับมุมสะท้อน และในทำนองเดียวกันทำให้มุม $A\hat{B}P$ เท่ากับมุม $A\hat{B}P'$ ด้วย ดังนั้น จึงพิสูจน์ได้ว่า $s = s'$ เมื่อ s คือระยะจากวัตถุถึงกระจก หรือ ระยะวัตถุ ส่วน s' คือระยะจากภาพถึงกระจก หรือ ระยะภาพ ซึ่งเมื่อพิจารณาระยะภาพ โดยให้หน้ากระจกเป็นบวกและหลังกระจกเป็นลบ

จะได้ $$s' = -s \qquad (11.4)$$



รูป 11.18 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะวัตถุและระยะภาพ

นอกจากนี้เรายังพบว่า การเปลี่ยนตำแหน่งในการมองภาพในกระจก ซึ่งจะทำให้รังสีของแสงที่เข้าตาเปลี่ยนไป และตำแหน่งบนกระจกที่รังสีจากวัตถุไปสะท้อนเปลี่ยนไป แต่ตำแหน่งของจุด P′ ก็จะยังคงเดิม นั่นคือ การย้ายตำแหน่งในการมองภาพในกระจกไม่ได้ทำให้ตำแหน่งของภาพที่เกิดจากกระจกเงาราบเปลี่ยนไป ดังรูป 11.19



รูป 11.19 การเปลี่ยนตำแหน่งในการมองภาพ

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งคือ ตำแหน่งของภาพนั้นไม่ได้อยู่บนผิวกระจกแต่จะอยู่ด้านหลังของกระจก ซึ่งอาจจะทำการทดสอบอย่างง่ายด้วยการมองภาพหน้าของตัวเองในกระจก โดยให้เอานิ้วไปวางทาบที่กระจกให้อยู่ในระดับเดียวกับภาพหน้าของตัวเองในกระจก จากนั้น ลองพยายามปรับระยะการมองเห็นให้โฟกัสไปที่นิ้ว จะพบว่า สามารถมองเห็นนิ้วชัดเจนแต่เห็นหน้าตัวเองไม่ชัดเจน ดังรูป 11.0 ก. ในขณะที่พยายามปรับระยะการมองเห็นให้โฟกัสไปที่หน้าในกระจก ดังรูป 11.20 ข. จะพบว่า สามารถเห็นหน้าตัวเองชัดเจนแต่ไม่สามารถเห็นนิ้วได้ชัดเจน นั่นแสดงว่า ตำแหน่งของภาพหน้าของตัวเองในกระจกไม่ได้อยู่ในตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งของนิ้วที่อยู่บนกระจก

ก. การปรับระยะมองเห็นที่นิ้ว

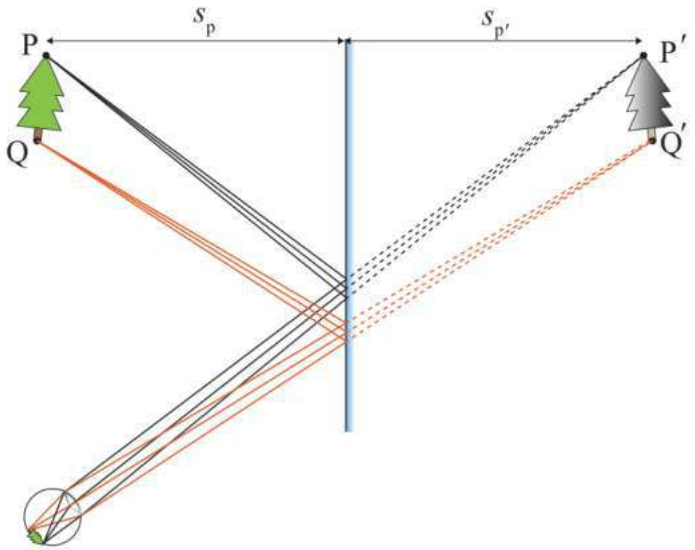
ข. การปรับระยะการมองเห็นที่หน้า

รูป 11.20 การทดสอบตำแหน่งภาพในกระจก

ชวนคิด

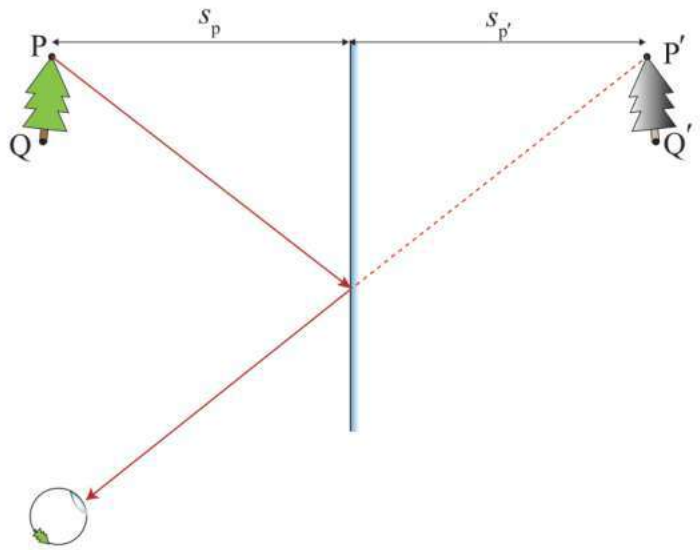
จะออกแบบการทดลองอย่างไรเพื่อพิสูจน์ว่า ระยะระหว่างภาพถึงกระจกเท่ากับระยะระหว่างวัตถุถึงกระจก

ในกรณี การเกิดภาพจากกระจกสำหรับวัตถุที่มีขนาดก็สามารถพิจารณาได้เช่นเดียวกับวัตถุที่เป็นจุดย้ายตำแหน่ง ดังรูป 11.21 ถ้าให้ภาพของยอดไม้ปรากฏที่จุด P′ และภาพของโคนต้นไม้ปรากฏที่จุด Q′ ซึ่งเป็นคนละตำแหน่งกัน เมื่อพิจารณารูปนี้อย่างถี่ถ้วนและทำความเข้าใจถึงการลากเส้นรังสีของแสงที่ทำให้เกิดภาพที่ตำแหน่ง P′ และ Q′ พบว่า จุด P′ และ Q′ ก็จะสมมาตรกับจุด P และ Q และทำให้ขนาดของภาพต้นไม้นั้นเท่ากับขนาดของต้นไม้ที่ปรากฏในตาเราด้วย



รูป 11.21 การมองภาพจากกระจกเงาสำหรับวัตถุที่มีขนาด

อาจกล่าวเกี่ยวกับการเห็นภาพได้ว่า การหาตำแหน่งในการมองเห็นภาพสามารถทำได้เพียงแค่การย้อนเส้นทางเดินของแสงกลับไปเป็นเส้นตรง จนรังสีของแสงต่าง ๆ มาตัดกันเกิดเป็นภาพ ซึ่งจำเป็นต้องมีรังสีที่บานออกจากวัตถุอย่างน้อยสองเส้นเพื่อให้เกิดการตัดกัน ถ้ามีรังสีของแสงเพียงเส้นเดียวจะไม่สามารถบอกได้ว่าภาพที่มองเห็นนั้นอยู่ที่ตำแหน่งใด แต่ในบางกรณี เช่น กระจกเงาราบ ซึ่งเรารู้ว่าตำแหน่งของภาพเกิดนั้นสมมาตรกับตำแหน่งของวัตถุโดยมีกระจกเป็นแกนสมมาตร จึงอาจจะไม่จำเป็นต้องเขียนรังสีของแสงเลย หรือบางครั้งจะเขียนเพียงหนึ่งเส้นเท่านั้น ดังรูป 11.22



รูป 11.22 การหาตำแหน่งของภาพจากการใช้หลักการสมมาตร

ภาพที่เกิดจากการหักเห

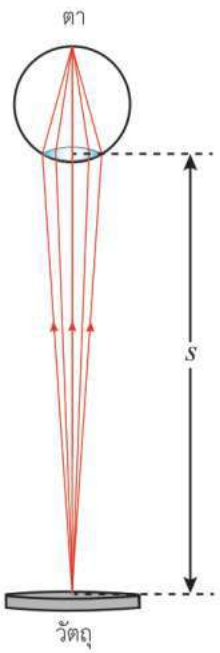
การมองแก้วน้ำในตำแหน่งที่ไม่สามารถเห็นสิ่งของในแก้วน้ำได้ ดังรูป 11.23 ก. แต่เมื่อเติมน้ำลงไปในแก้วกลับทำให้สามารถมองเห็นเหรียญที่อยู่ในแก้วน้ำได้ แม้ผู้สังเกตจะยังคงมองอยู่ที่ตำแหน่งเดิม ดังรูป 11.23 ข. เหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น

ก. แก้วน้ำที่ไม่มีน้ำ

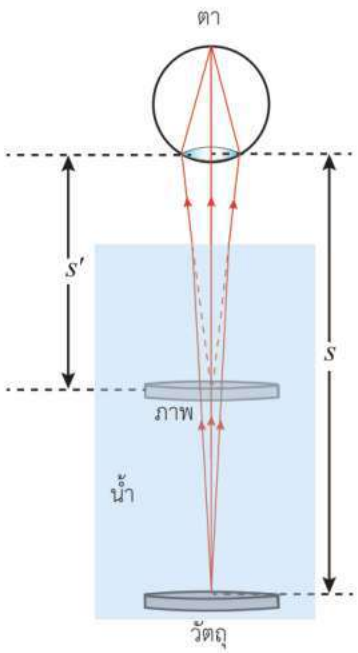
ข. แก้วน้ำที่เติมน้ำ

รูป 11.23 การมองแก้วน้ำที่ตำแหน่งเดิมขณะที่แก้วน้ำไม่มีน้ำและมีน้ำ

การอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นดังรูป 11.23 สามารถทำได้โดยการศึกษาการเกิดภาพของเหรียญที่วางอยู่ที่ก้นของแก้วน้ำจากการมองแนวดิ่ง ซึ่งจะพบว่า ในขณะที่ยังไม่ได้เติมน้ำ เราจะเห็นเหรียญห่างจากตาเราเป็นระยะหนึ่งจากการที่มีแสงจากเหรียญมาเข้าตา ดังรูป 11.24 ก. แต่ถ้าเราเติมน้ำลงไป แสงที่ออกจากเหรียญ จะเกิดการหักเหที่ตรงรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ นั่นคือเส้นรังสีของแสงในน้ำและในอากาศนั้นไม่ได้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน และเมื่อเราย้อนทางเดินเส้นรังสีที่เข้าสู่ตาเพื่อหาตำแหน่งที่รังสีตัดกัน ซึ่งเป็นตำแหน่งของภาพที่ตามองเห็น ดังรูป 11.24 ข. จะพบว่า ตำแหน่งที่มองเห็นเหรียญในแก้วที่ไม่มีน้ำจะแตกต่างกับตำแหน่งที่มองเห็นเหรียญในแก้วที่มีน้ำ



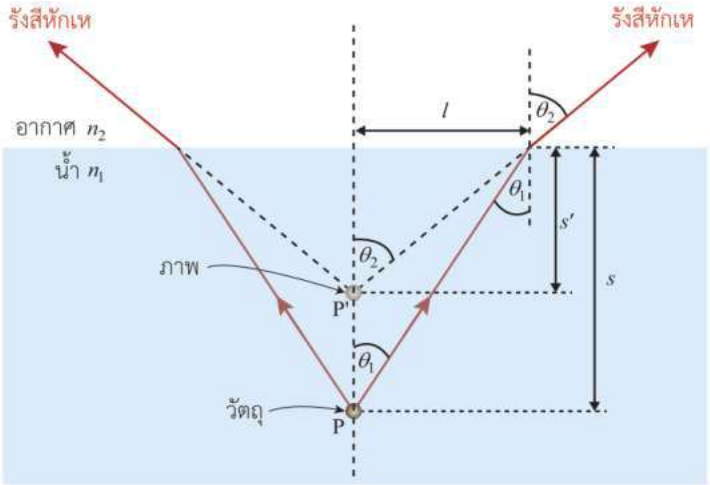
ก. การมองเห็นวัตถุโดยตรง



ข. การมองเห็นวัตถุผ่านน้ำ

รูป 11.24 การมองเห็นวัตถุผ่านการหักเหของแสงที่ผิวน้ำ

จากความรู้ที่ว่าเมื่อแสงเดินทางจากน้ำซึ่งมีดรรชนีหักเหมากกว่าไปยังอากาศซึ่งมีดรรชนีหักเหน้อยกว่า รังสีหักเหจะเบนออกจากเส้นแนวฉาก ทำให้เมื่อเราย้อนเส้นทางของแสงที่เข้าตาเราไปเป็นเส้นตรง เราจะพบว่า ภาพเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง P' อยู่ตื้นกว่าวัตถุจริง หรือกล่าวได้ว่า "ความลึกที่ปรากฏต่อสายตาของเรา นั้นน้อยกว่า ความลึกจริงของวัตถุ" สามารถพิสูจน์ได้จากการเขียนแผนภาพรังสีของแสงดังรูป 11.25



รูป 11.25 รังสีของแสงของภาพที่เกิดจากการหักเห

จากรูป พิจารณาสามเหลี่ยมสองรูป คือ รูปของวัตถุจริงที่มีจุด P เป็นจุดยอดและมีด้าน l เป็นฐานและรูปของภาพที่มีจุด P' เป็นจุดยอดและมีด้าน l เป็นฐาน s เป็นความลึกจริง s' เป็นความลึกปรากฏ ซึ่งจะเห็นว่า $\tan\theta_1 = \frac{l}{s}$ และ $\tan\theta_2 = \frac{l}{s'}$

ดังนั้น $$\frac{s'}{s} = \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2}$$

ถ้าให้มุม θ_1 และมุม θ_2 เป็นมุมน้อย ๆ จนถือได้ว่า $\tan\theta \approx \sin\theta$ จะได้

$$\frac{s'}{s} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2}$$

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

จะได้ $$\frac{s'}{s} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (11.5)$$

สมการ (11.5) เป็นสมการในการหาความลึกที่ปรากฏ (s') เนื่องจากการหักเหของแสง โดยมีเงื่อนไขประการสำคัญของสมการนี้คือ มุม θ_1 และมุม θ_2 ต้องเป็นมุมน้อย ๆ ซึ่งจะเกิดขึ้นได้ในกรณีที่เรามองวัตถุตรง ๆ ในแนวของเส้นแนวฉากเท่านั้น โดยแนวสายตาจะตรงตั้งฉากกับผิวน้ำ ถ้ามองผิวน้ำเอียง ๆ ตำแหน่งของภาพกับวัตถุก็จะไม่สามารถใช้สมการ (11.5) ได้

ข้อสังเกต

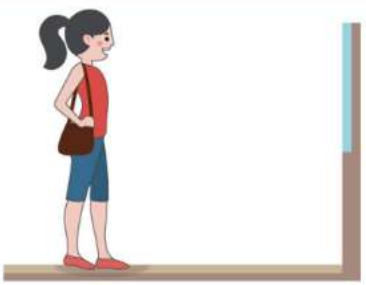
จากสมการ (11.5) จะเห็นว่า ผู้สังเกตอยู่ในตัวกลาง n_2 และวัตถุอยู่ในตัวกลาง n_1 ในกรณีที่เราสังเกตปลาอยู่ในน้ำ ซึ่งมีดรรชนีหักเหเท่ากับ 1.33 ส่วนดรรชนีหักเหของอากาศเท่ากับ 1.00 ทำให้ $s' < s$ เช่น ถ้าปลาอยู่ลึกจากผิวน้ำเป็นระยะ s เท่ากับ 80 เซนติเมตร เราจะได้ระยะภาพ s' เท่ากับ 60 เซนติเมตร นั่นคือ เราจะเห็นปลาอยู่ลึกจากผิวน้ำเพียง 60 เซนติเมตร ซึ่งตื้นกว่าความเป็นจริง

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 11.2

1. การสะท้อนของแสงทำให้เกิดภาพได้อย่างไร
2. การหักเหของแสงทำให้เกิดภาพได้อย่างไร

แบบฝึกหัด 11.2

1. หญิงคนหนึ่งสูง h ยืนอยู่หน้ากระจก ดังรูป จงหาขนาดความสูงของกระจกที่น้อยที่สุดที่ทำให้ผู้หญิงคนนี้สามารถมองตัวเองได้เต็มตัว และต้องติดตั้งกระจกสูงจากพื้นเท่าใด



รูป ประกอบแบบฝึกหัด 11.2 ข้อ 1

2. ปลาอยู่ในน้ำที่ระดับความลึกจากผิวน้ำ 0.20 เมตร ความลึกปรากฏของปลาเป็นเท่าใด เมื่อผู้สังเกตมองปลาในแนวดิ่งตรงตัวปลา กำหนดให้ดรรชนีหักเหของอากาศเท่ากับ 1.00 และดรรชนีหักเหของน้ำเท่ากับ 1.33
3. ถ้าปลาตัวหนึ่งมองนกอินทรีที่บินอยู่ในอากาศสูงจากผิวน้ำ 20.00 เมตร ปลาจะเห็นนกอินทรีสูงจากผิวน้ำเท่าใด กำหนดให้ น้ำมีดรรชนีหักเหเท่ากับ 1.33 และอากาศมีดรรชนีหักเหเท่ากับ 1.00

11.3 ภาพจากเลนส์บางและกระจกเงาทรงกลม

จากการศึกษาการเกิดภาพของการสะท้อนและการหักเห สามารถนำมาใช้ในการอธิบายการเกิดภาพจากเลนส์บาง และการเกิดภาพจากกระจกเงาทรงกลม ดังต่อไปนี้

11.3.1 การเกิดภาพจากเลนส์บาง

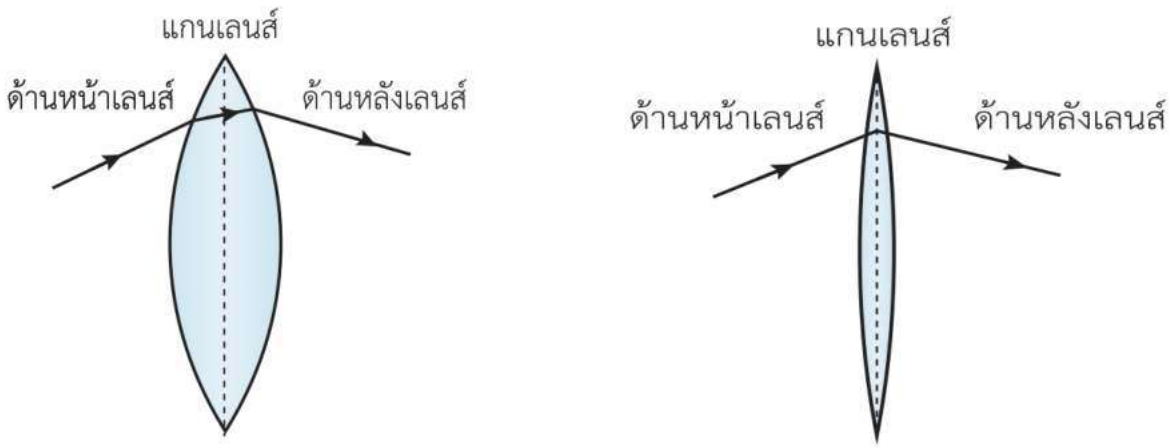
เลนส์บาง เป็นอุปกรณ์ทางแสงที่ทำงานโดยใช้หลักการหักเหของแสง ทำจากแก้วหรือพลาสติกโปร่งใส ที่มีผิวโค้งทรงกลมทั้งสองข้างไม่ขนานกัน เลนส์บางมี 2 ชนิดคือ **เลนส์นูน** (convex lens) และ **เลนส์เว้า** (concave lens) ดังรูป 11.26

ก. เลนส์นูน ข. เลนส์เว้า

รูป 11.26 เลนส์นูนและเลนส์เว้าแบบต่าง ๆ

ภาพที่เกิดจากเลนส์นูน

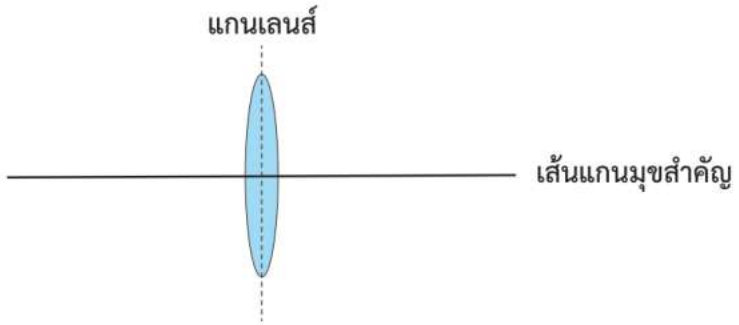
เลนส์นูนเป็นเลนส์ที่มีลักษณะตรงกลางเลนส์หนากว่าที่ขอบเลนส์ โดยทั่วไปจะมีผิวนูนทั้งสองด้าน ถ้าเราฉายแสงเลเซอร์ผ่านเลนส์นูน จะพบว่า แสงที่ผ่านเลนส์จะเกิดการหักเหสองครั้ง โดยครั้งแรกเกิดที่ผิวด้านหน้า และครั้งที่สองเกิดที่ผิวด้านหลังของเลนส์ ผลจากการหักเหทั้งสองครั้งนี้ ทำให้รังสีของแสงมีการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม ดังรูป 11.27 ก. ซึ่งในระดับนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะเลนส์บางที่ความหนาของเลนส์น้อยๆ และถือว่ารังสีหักเหผ่านเลนส์เพียงครั้งเดียวที่แกนเลนส์ ดังรูป 11.27 ข.



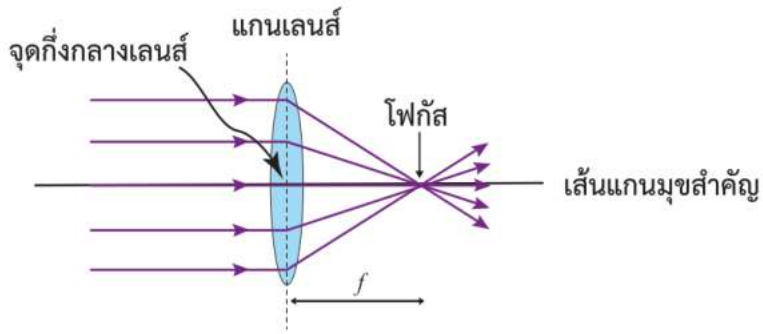
ก. การหักเหของแสงผ่านเลนส์หนา ข. การหักเหของแสงผ่านเลนส์บาง

รูป 11.27 แผนภาพแสดงการหักเหของแสงผ่านเลนส์

เพื่อให้สะดวกในอธิบายการหักเหของแสงผ่านเลนส์บาง นิยมสร้างเส้นสมมติที่ตั้งฉากกับแกนเลนส์และผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ เรียกว่า **เส้นแกนมุขสำคัญ** (principal axis) ดังรูป 11.28 ก. ซึ่งถ้ามีรังสีของแสงที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญมาตกกระทบเลนส์ รังสีขนานเหล่านี้จะหักเหผ่านเลนส์แล้วไปตัดกันที่จุดจุดหนึ่งบนเส้นแกนมุขสำคัญ คือ **โฟกัส** (focus) ของเลนส์ เรียกระยะจากโฟกัสไปถึงจุดกึ่งกลางเลนส์ว่า **ความยาวโฟกัส** (focal length) และใช้สัญลักษณ์ f แทนความยาวโฟกัส ดังรูป 11.28 ข. การที่เลนส์นูนทำให้รังสีของแสงขนานลู่เข้าหากัน ทำให้บางครั้งเรียกเลนส์นูนว่า **เลนส์รวมแสง** (converging lens)



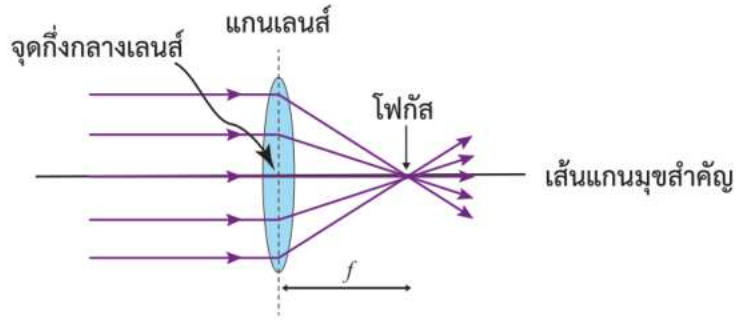
ก. เส้นแกนมุขสำคัญของเลนส์นูน



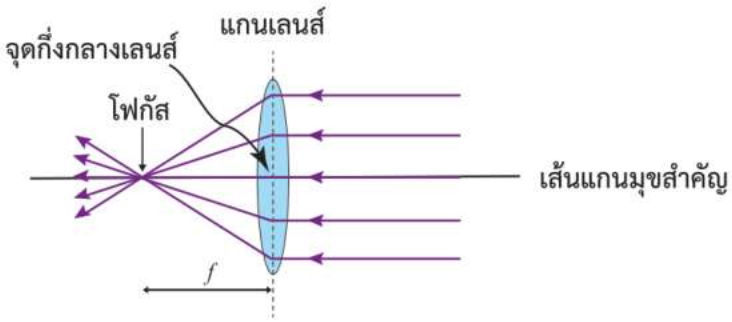
ข. รังสีตกกระทบขนานเส้นแกนมุขสำคัญไปพบกันที่โฟกัส

รูป 11.28 เส้นแกนมุขสำคัญและการหักเหของแสงผ่านเลนส์นูน

สำหรับเลนส์นูนบาง จะมีความสมมาตรของเลนส์คือ ถ้ามีแสงขนานเข้ามาจากทางด้านขวาของเลนส์ ก็จะตัดกันที่โฟกัสทางด้านซ้ายของเลนส์ โดยมีระยะโฟกัสเท่ากันทั้งสองด้าน ดังรูป 11.29 เราจึงมักพบว่ามีการเขียนโฟกัสไว้ทั้งสองด้านของเลนส์



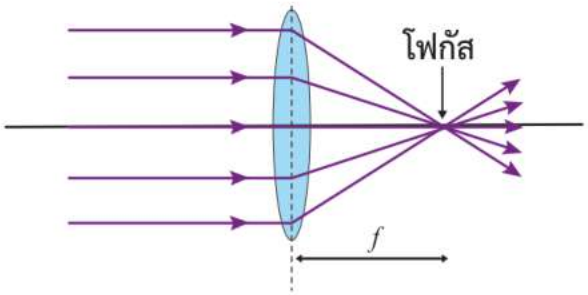
ก. การเกิดโฟกัสทางด้านขวาของเลนส์นูน



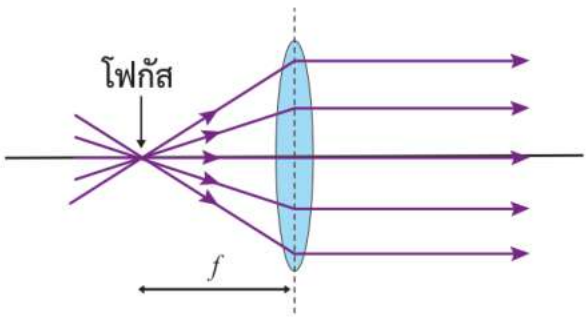
ข. การเกิดโฟกัสทางด้านซ้ายของเลนส์นูน

รูป 11.29 โฟกัสของเลนส์นูน

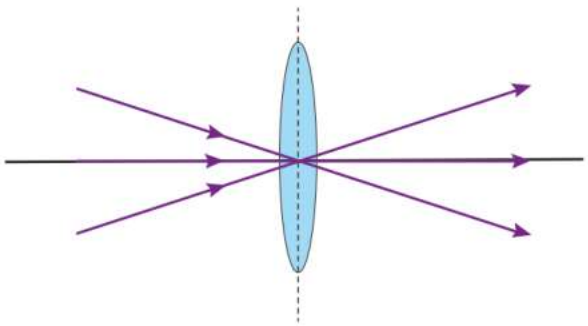
ลักษณะที่สำคัญในการหักเหของแสงผ่านเลนส์นูนแสดงได้ดังรูป 11.30 กล่าวคือ ถ้ารังสีของแสงที่ผ่านเลนส์มีทิศทางขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ รังสีหักเหจะรวมกันที่โฟกัส ดังรูป 11.30 ก. ถ้ารังสีของแสงที่ผ่านโฟกัสที่หน้าเลนส์ รังสีหักเหจะมีทิศทางขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ ดังรูป 11.30 ข. ถ้ารังสีของแสงที่ผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ รังสีหักเหจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่ ดังรูป 11.30 ค.



ก. รังสีของแสงที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญจะรวมกันที่โฟกัสด้านหลังเลนส์



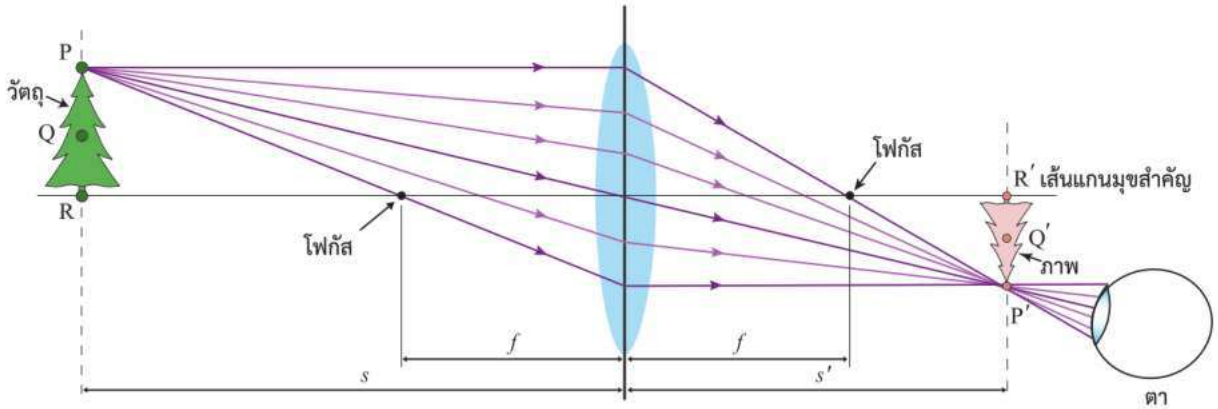
ข. รังสีของแสงที่ผ่านโฟกัสด้านหน้าเลนส์จะหักเหเป็นรังสีที่ขนานเส้นแกนมุขสำคัญ



ค. รังสีของแสงที่ผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงจากเดิม

รูป 11.30 รังสีของแสงที่ผ่านเลนส์นูน

สิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับเลนส์ ไม่ใช่แค่เรื่องของการรวมแสงขนานมายังโฟกัสเท่านั้น แต่จะเป็นการใช้เลนส์เพื่อรวมแสงที่กระจายออกจากจุดต่าง ๆ บนวัตถุ เพื่อทำให้เกิดภาพ ดังแสดงในรูป 11.31



รูป 11.31 แผนภาพรังสีแสดงการเกิดภาพจากเลนส์นูน

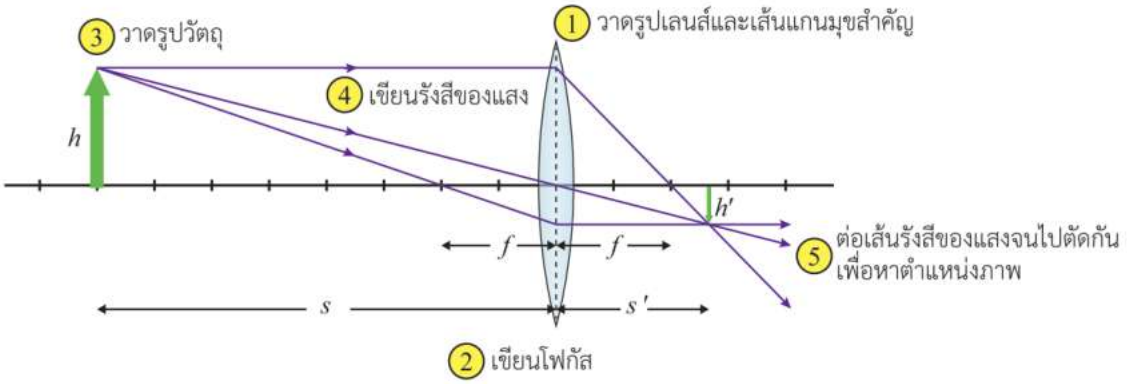
พิจารณารังสีของแสงที่ออกจากจุด P บนวัตถุ (ส่วนยอดของต้นไม้) ซึ่งมีรังสีไปทุกทิศทาง โดยในที่นี้แสดงเฉพาะส่วนที่มาถึงเลนส์และเขียนแทนด้วยรังสีจำนวนหนึ่ง ซึ่งในรูปจะเขียนทั้งหมด 6 เส้น รังสีเหล่านี้ไม่ได้ขนานกัน แต่ออกมาจากจุดเดียวกัน และเมื่อผ่านเลนส์แล้วจะหักเหไปตัดกันที่จุด P′ จากนั้น รังสีของแสงที่ตัดกันที่จุด P′ ก็เดินทางต่อไปเป็นแนวเส้นตรง ถ้ารังสีที่ผ่านจุด P′ นี้ มาเข้าตาเรา (สังเกตตำแหน่งของลูกตาในรูป 11.31) ตาและสมองของเราจะแปลความหมายว่า รังสีเหล่านั้นออกมาจากจุด P′ นั่นคือ เราจะเห็นภาพของยอดต้นไม้อยู่ที่จุด P′ ไม่ใช่จุด P

การมองเห็นตำแหน่งอื่น ๆ ของต้นไม้ก็สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกัน เช่น ถ้าเราสนใจมองส่วนกลางของต้นไม้ที่จุด Q แสงจากจุดนี้เมื่อผ่านเลนส์แล้วก็จะมาตัดกันที่จุด Q′ และเราก็จะเห็นภาพของส่วนกลางของต้นไม้อยู่ที่จุด Q′ หรือถ้าสนใจมองส่วนโคนของต้นไม้ที่จุด เราก็จะเห็นภาพของส่วนโคนของต้นไม้อยู่ที่จุด R′ ดังนั้น ถ้าเรามองต้นไม้นี้ผ่านเลนส์ตามรูป 11.31 เราจะเห็นภาพของต้นไม้ทั้งต้นจากจุด P′ ถึง R′ เพื่อความสะดวกในการศึกษาการเกิดภาพจากเลนส์ เราจึงไม่จำเป็นต้องหาภาพส่วนอื่น ๆ ของต้นไม้ทั้งหมด เพียงแต่หาตำแหน่งภาพของยอดต้นไม้ เราก็สามารถระบุได้ว่า ภาพของต้นไม้ทั้งต้นจะอยู่ที่ตำแหน่งใด

การที่มีเลนส์นูนกั้นระหว่างวัตถุกับตาเราทำให้แสงจากวัตถุที่บานออกแล้วหักเหแล้วไปตัดกันที่จุด P′ ก่อนมาเข้าตาเรานั้น ทำให้ตาและสมองเราแปลความหมายว่า มีแสงบานออกจากจุด P′ ซึ่งเป็นตำแหน่งของภาพ แทนที่จะเป็นจุด P บนวัตถุ และตาเราจะเห็นภาพวัตถุอยู่ที่ตำแหน่ง P′

เราสามารถหาตำแหน่งภาพของวัตถุที่วางตั้งฉากบนแกนมุขสำคัญได้จากการเขียนแผนภาพรังสีของแสง ดังรูป 11.32 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. วาดรูปเลนส์และเขียนเส้นแกนมุขสำคัญ
2. เขียนโฟกัสที่ทั้งสองด้านของเลนส์
3. วาดรูปวัตถุไว้บนเส้นแกนมุขสำคัญที่ด้านหน้าเลนส์ (ตำแหน่งของวัตถุจะเป็นด้านหน้าของเลนส์)
4. เขียนรังสีของแสงออกจากส่วนปลายบนของวัตถุ โดยเขียนรังสีสามเส้น ได้แก่
   - รังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ เมื่อผ่านเลนส์จะหักเหผ่านโฟกัส
   - รังสีที่ผ่านโฟกัสด้านใกล้วัตถุ เมื่อผ่านเลนส์จะหักเหเป็นรังสีขนานเส้นแกนมุขสำคัญ
   - รังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์ เมื่อผ่านเลนส์จะไม่มีการเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม
5. ต่อเส้นรังสี จนรังสีทั้งสามไปตัดกัน จะเป็นตำแหน่งภาพของปลายบนของวัตถุ จากนั้นวาดภาพวัตถุส่วนที่เหลือทั้งหมดจากภาพปลายบนไปตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ



รูป 11.32 การตำแหน่งของภาพได้จากการเขียนรังสีของแสง

กิจกรรมลองทำดู

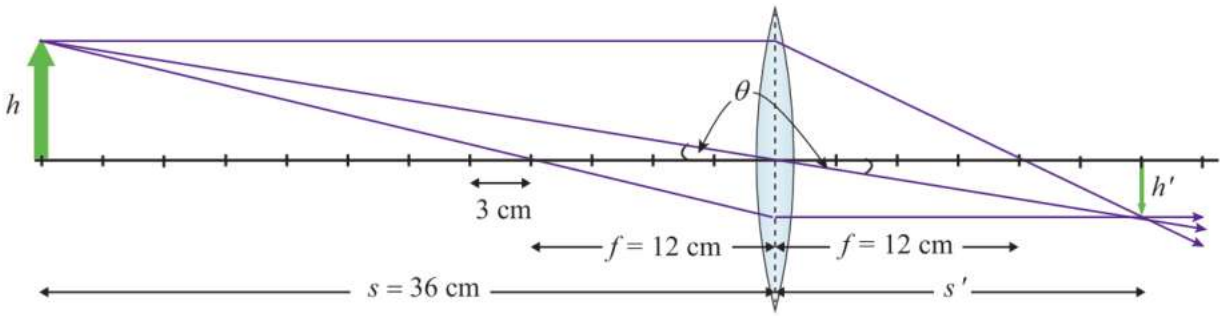
เขียนรังสีของแสงที่ผ่านเลนส์นูนโดยใช้รังสีของแสงจากจุดต่าง ๆ ของวัตถุ เช่น ส่วนปลายบนของวัตถุ กึ่งกลางของวัตถุ และส่วนปลายล่างของวัตถุ จากนั้นให้เปรียบเทียบตำแหน่งของภาพที่เกิดขึ้น

เราเรียกภาพที่เกิดขึ้น โดยรังสีของแสงที่หักเหไปตัดกันจริง ๆ ว่า **ภาพจริง** (real image) โดยภาพที่เกิดขึ้นมีลักษณะกลับหัวกับวัตถุ

ตัวอย่าง 11.5 จงเขียนแผนภาพรังสีของแสง เพื่อหาระยะภาพที่เกิดจากเลนส์นูนซึ่งมีความยาวโฟกัส 12 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุสูง 6 เซนติเมตร ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน 36 เซนติเมตร

แนวคิด กำหนดสเกลที่เหมาะสมกับระยะต่าง ๆ ตามที่โจทย์กำหนด และเขียนวัตถุบนเส้นแกนมุขสำคัญ จากนั้น เขียนรังสีของแสงจากส่วนปลายบนของวัตถุเพื่อหาจุดตัดของรังสีทั้ง 3 เส้น คือ รังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ รังสีที่ผ่านโฟกัสด้านใกล้วัตถุ และรังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์

วิธีทำ เขียนแผนภาพรังสีของแสง ได้ดังนี้



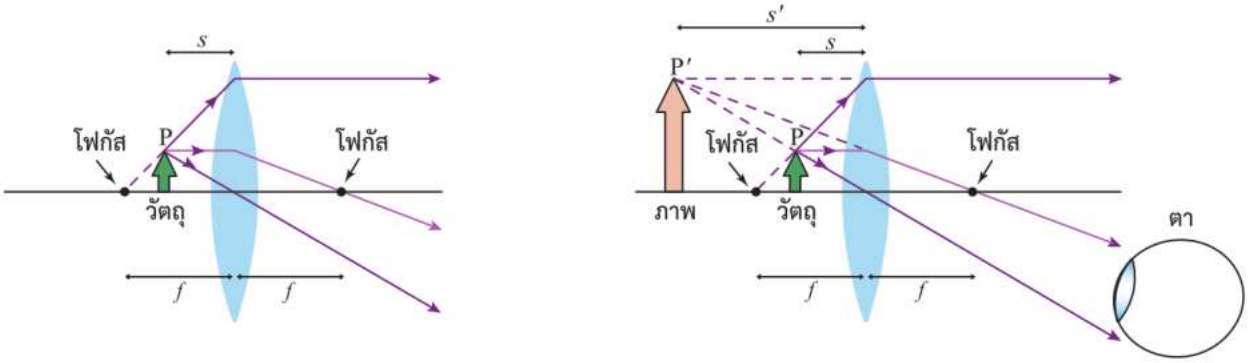
รังสีทั้งสามจะไปตัดกันที่ตำแหน่งที่เกิดภาพ นั่นคือ ภาพเกิดขึ้นที่ระยะภาพเท่ากับ 18 เซนติเมตร

ตอบ ภาพที่เกิดจากเลนส์นูนอยู่หลังเลนส์และห่างจากศูนย์กลางเลนส์เป็นระยะทางเท่ากับ 18 เซนติเมตร

ชวนคิด

ถ้าใช้รังสีเพียงสองเส้นจะเพียงพอที่จะหาตำแหน่งของภาพหรือไม่ อย่างไร

ในกรณีวางวัตถุห่างจากเลนส์นูนน้อยกว่าความยาวโฟกัส พบว่า จะไม่สามารถลากรังสีจากปลายบนของวัตถุไปยังเลนส์ให้ผ่านโฟกัสที่อยู่ใกล้กับวัตถุได้ จำเป็นต้องเขียนรังสีไปยังเลนส์โดยเสมือนว่ารังสีนี้ออกมาจากโฟกัสที่อยู่ใกล้วัตถุ ส่วนรังสีอีกสองเส้นยังคงลากตามเดิม ดังรูป 11.33 ก. ซึ่งจะพบว่ารังสีทั้งสามที่ผ่านเลนส์แล้วจะถ่างออกจากกัน จึงไม่สามารถลากเส้นรังสีไปตัดกันได้จริงเหมือนในตัวอย่างที่ผ่านมา อย่างไรก็ตาม เมื่อรังสีทั้งสามนี้มาเข้าตาเรา เราก็ยังเห็นภาพและจะบอกว่าตำแหน่งของภาพคือตำแหน่งที่รังสีทั้งสามนี้ย้อนเป็นเส้นตรงกับไปตัดกัน ซึ่งคือจุด P′ ดังรูป 11.33 ข.



ก. การเขียนรังสีไปยังเลนส์ ข. ตำแหน่งของภาพ

รูป 11.33 วางวัตถุห่างจากเลนส์นูนน้อยกว่าความยาวโฟกัส

ภาพของวัตถุที่เกิดขึ้นดังรูป 11.33 เรียกว่า **ภาพเสมือน** (virtual image) โดยภาพชนิดนี้ไม่ได้เกิดด้านหลังเลนส์ แม้แสงที่ออกจากวัตถุนั้นเดินทางผ่านเลนส์แล้วหักเหไปทางด้านหลังเลนส์ก็ตาม กล่าวคือ แสงไม่ได้ไปตัดกันที่ตรงตำแหน่งที่เกิดภาพ ดังนั้น ในการเขียนรังสีเพื่อหาตำแหน่งภาพ จะต้องต่อรังสีย้อนกลับไปจนตัดกัน ก็จะเป็นตำแหน่งของภาพที่เกิดขึ้น

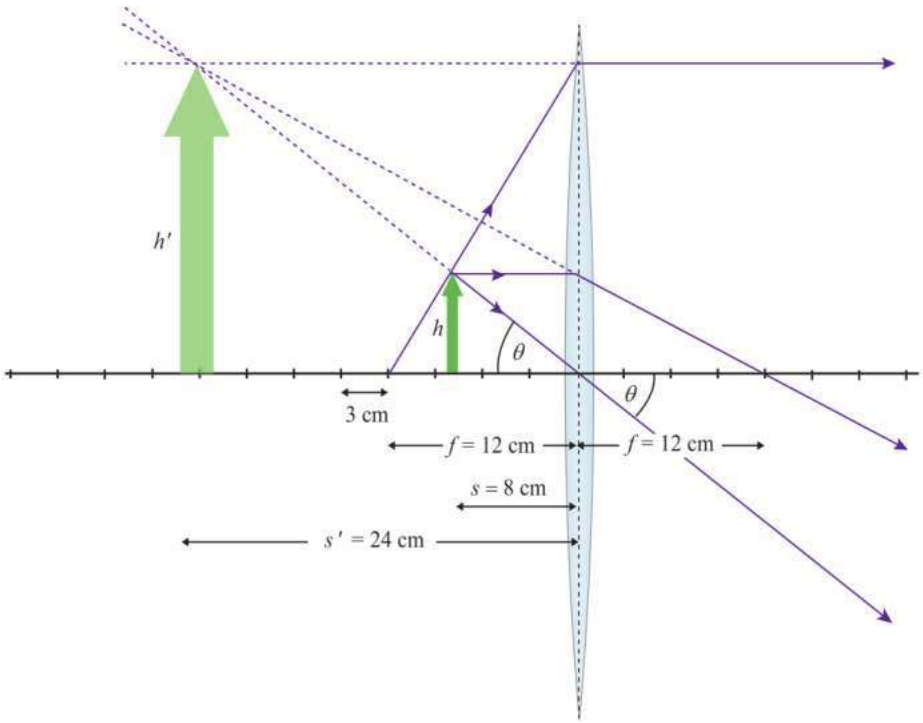
การพิจารณาว่า ภาพที่เกิดขึ้นเป็นการเกิดภาพจริงหรือภาพเสมือน ให้พิจารณาจาก รังสีของแสงไปตัดกันที่จุดที่เกิดภาพหรือไม่ โดยถ้ารังสีแสงตัดกันจริง แสดงว่าแสงออกมาจากจุดนั้นจริง ภาพที่เกิดขึ้นจึงเป็นภาพจริง แต่ถ้าแสงไม่ได้ตัดกันจริงแต่เสมือนว่าออกมาจากจุดที่เกิดภาพ ภาพที่เกิดขึ้นก็จะเป็นภาพเสมือน

ความเข้าใจเรื่องการตัดกันของรังสีของแสงสำหรับภาพจริงและภาพเสมือนทำให้เราสามารถบอกได้ว่า ภาพที่เกิดขึ้นจากกระจกเงาราบนั้นเป็นภาพเสมือนเพราะแสงไม่ได้เดินทางไปตัดกันจริง ๆ ในตำแหน่งที่เกิดภาพ และภาพนั้นก็เกิดขึ้นเพราะเราย้อนทางเดินของแสงเข้าไปภายในกระจกเงาราบ

ตัวอย่าง 11.6 จงเขียนรังสีของแสง เพื่อแสดงภาพที่เกิดจากเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 12 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุสูง 6 เซนติเมตร ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์นูน 8 เซนติเมตร

แนวคิด กำหนดสเกลที่เหมาะสมกับระยะต่างๆ ตามที่โจทย์กำหนด และเขียนวัตถุบนแกนมุขสำคัญ จากนั้น เขียนรังสีของแสงจากส่วนปลายบนของวัตถุเพื่อหาจุดตัดของรังสีทั้ง 3 เส้น คือ รังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญรังสีที่ผ่านโฟกัสด้านใกล้วัตถุ และรังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลางของเลนส์ โดยหากรังสีทั้งสามที่ผ่านเลนส์แล้วจะถ่างออกจากกัน จะต้องลากเส้นรังสีย้อนเป็นเส้นตรงไปตัดกันที่หน้าเลนส์

วิธีทำ เขียนแผนภาพรังสีของแสง ได้ดังนี้



รังสีทั้งสามจะไปตัดกันที่ตำแหน่งที่หน้าเลนส์ โดยภาพเกิดขึ้นที่ระยะภาพเท่ากับ 24 เซนติเมตร

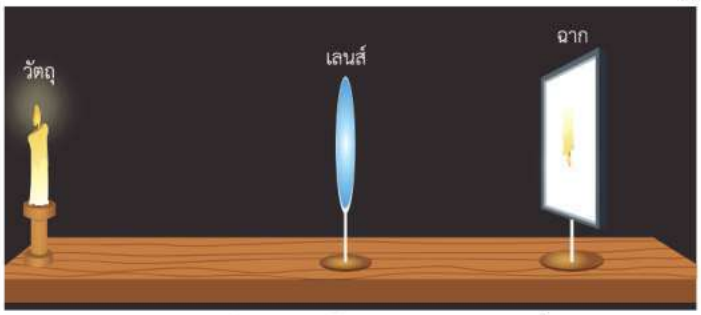
ตอบ ภาพที่เกิดจากเลนส์นูนอยู่หน้าเลนส์และห่างจากศูนย์กลางเลนส์เป็นระยะทางเท่ากับ 24 เซนติเมตร

จากตัวอย่าง 11.15 และ 11.6 จะพบว่า ภาพที่เกิดจากเลนส์นูนสามารถเป็นได้ทั้งภาพจริงและภาพเสมือนขึ้นกับระยะวัตถุเทียบกับความยาวโฟกัส โดยถ้าระยะวัตถุมากกว่าความยาวโฟกัสจะได้ภาพจริง เพราะแสงที่หักเหผ่านเลนส์จะลู่เข้าหากันไปตัดกันจริงที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งเสมอ แต่ถ้าระยะวัตถุน้อยกว่าความยาวโฟกัสจะทำให้รังสีของแสงที่ผ่านเลนส์บานออก รังสีของแสงที่ผ่านเลนส์จึงไม่ตัดกันที่บริเวณด้านหลังเลนส์ ภาพที่เกิดขึ้นจึงเป็นภาพเสมือน

ฉากรับภาพกับชนิดของภาพ

การมองเห็นภาพโดยการนำตาไปรับแสงที่หักเหผ่านเลนส์โดยตรงดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น มีข้อจำกัดคือ ตาของมนุษย์ไม่สามารถแยกแยะได้ว่าภาพที่มองเห็นเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน เพราะตาของมนุษย์มองเห็นภาพทั้งสองชนิดได้เหมือนกัน วิธีการหนึ่งเพื่อแสดงว่าภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือนคือการสร้างเส้นทางเดินของรังสีของแสงเพื่อพิสูจน์ว่ารังสีของแสงที่หักเหตัดกันจริงหรือไม่

อย่างไรก็ตาม เมื่อนำฉากไปรับภาพแทนการใช้ตามองดูภาพจะพบความแตกต่างระหว่างภาพจริงกับภาพเสมือน กล่าวคือ ถ้าเรานำฉาก เช่น กระดาษขาว ไปวางไว้ที่ตำแหน่งที่เกิดภาพจริงดังรูป 11.34 เราจะพบว่า ภาพของเทียนที่เป็นวัตถุนั้นปรากฏบนฉากด้วย โดยภาพที่ปรากฏบนฉากดังกล่าวสามารถเห็นได้จากการมองด้านหน้าหรือด้านข้างของฉาก แต่ถ้านำฉากออกแล้วมองจากด้านข้างหรือด้านอื่น ๆ ที่แสงหักเหผ่านเลนส์ไม่ได้เข้าตาเราโดยตรง เราก็จะไม่เห็นภาพปรากฏขึ้นที่ตำแหน่งดังกล่าว



รูป 11.34 การนำฉากมารับภาพจริงจากเลนส์นูน

ในทางกลับกัน ถ้าเรานำฉากไปวางในตำแหน่งที่เกิดภาพเสมือน จะไม่ปรากฏภาพขึ้นบนฉากเหมือนภาพจริง เพราะไม่ได้มีแสงไปตัดกันจริง ๆ ที่จุดนั้น ดังนั้น เราจึงสามารถใช้เรื่องการนำฉากไปรับภาพ มาจำแนกชนิดของภาพได้ ถ้าเป็นภาพจริงจะนำฉากไปรับได้ ส่วนภาพเสมือนจะนำฉากไปรับไม่ได้ (ไม่เกิดภาพบนฉาก)

ลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งของภาพเสมือนที่เกิดจากเลนส์นูน คือ ภาพเสมือนที่เกิดขึ้นจะเป็นภาพเสมือนหัวตั้งที่มีขนาดโตกว่าขนาดวัตถุ เราจึงสามารถนำหลักการเกิดภาพเสมือนของเลนส์นูนนี้ไปสร้างเป็นแว่นขยาย ดังรูป11.35

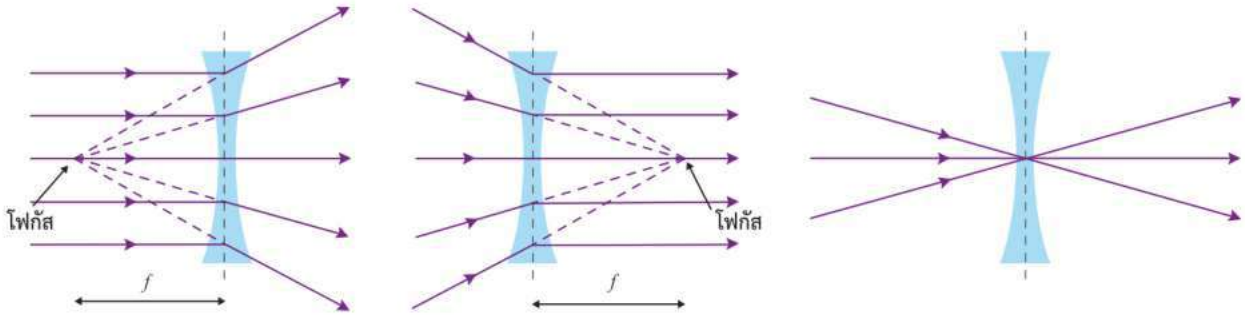
รูป 11.35 การใช้เลนส์นูนเป็นแว่นขยาย

ชวนคิด

การใช้เลนส์นูนเป็นแว่นขยาย ระยะวัตถุต้องเป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับความยาวโฟกัสของเลนส์

การเกิดภาพจากเลนส์เว้า

เลนส์เว้าเป็นเลนส์ที่มีลักษณะตรงกลางเลนส์บางกว่าที่ขอบเลนส์ โดยลักษณะสำคัญในการหักเหของแสงผ่านเลนส์เว้า คือ ถ้ามีแสงขนานเส้นแกนมุขสำคัญตกกระทบเลนส์เว้า แสงนั้นจะหักเหในลักษณะที่บานออก เสมือนว่าออกมาจากจุดหนึ่งที่อยู่บนเส้นแกนมุขสำคัญด้านหน้าเลนส์ ที่เรียกว่าโฟกัส ดังรูปที่ 11.36 ก. แต่ถ้ามีแสงที่ลู่เข้าไปยังโฟกัสที่อยู่ด้านหลังเลนส์ แสงนี้ก็จะถ่างออกเป็นแสงขนาน ดังรูป 11.36 ข. นอกจากนี้ ถ้ามีรังสีใดที่ผ่านจุดกึ่งกลางของเลนส์เว้าพอดีก็จะไม่มีการหักเห ดังรูป 11.36 ค.



ก. รังสีของแสงที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ

ข. รังสีของแสงมีแนวผ่านโฟกัสด้านหลังเลนส์

ค. รังสีของแสงมีแนวผ่านจุดกึ่งกลางเลนส์

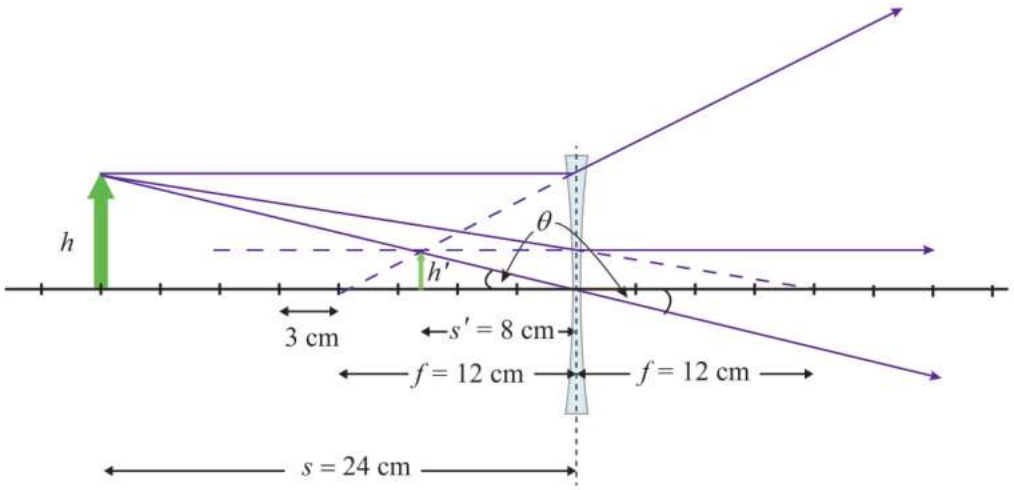
รูป 11.36 การหักเหของแสงผ่านเลนส์เว้า

ส่วนการหาตำแหน่งของภาพที่เกิดจากเลนส์เว้า ก็ทำได้ในทำนองเดียวกับการเขียนแผนภาพรังสีของแสงสำหรับเลนส์นูน เพียงแต่เมื่อรังสีต่าง ๆ มาถึงเลนส์ก็จะหักเหตามรูป 11.36

ตัวอย่าง 11.7 จงเขียนแผนภาพรังสีของแสง เพื่อแสดงภาพที่เกิดจากเลนส์เว้าที่มีความยาวโฟกัส 12 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุสูง 6 เซนติเมตร ไว้ที่ระยะห่างจากเลนส์เว้า 24 เซนติเมตร

แนวคิด กำหนดสเกลที่เหมาะสมกับระยะต่าง ๆ ตามที่โจทย์กำหนด และเขียนวัตถุบนเส้นแกนมุขสำคัญ จากนั้น เขียนรังสีของแสงจากส่วนปลายบนของวัตถุเพื่อหาจุดตัดของรังสีทั้ง 3 เส้น คือ รังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ รังสีที่ผ่านโฟกัสด้านใกล้วัตถุ และรังสีที่ผ่านจุดกึ่งกลางของเลนส์ โดยหากรังสีทั้งสามที่ผ่านเลนส์แล้วจะถ่างออกจากกัน จะต้องลากเส้นรังสีย้อนเป็นเส้นตรงไปตัดกันที่หน้าเลนส์

วิธีทำ เขียนแผนภาพรังสีของแสง ได้ดังนี้



รังสีทั้งสามจะไปตัดกันที่ตำแหน่งที่หน้าเลนส์ โดยภาพเกิดขึ้นที่ระยะภาพเท่ากับ 8 เซนติเมตร

ตอบ ภาพที่เกิดจากเลนส์นูนอยู่หน้าเลนส์และห่างจากศูนย์กลางเลนส์เป็นระยะทางเท่ากับ 8 ซนติเมตร

จากตัวอย่าง 11.7 จะพบว่า เมื่อแสงจากวัตถุผ่านเลนส์เว้าจะบานออกมากขึ้น จึงไม่มีโอกาสที่รังสีของแสงเหล่านั้นตัดกันที่ด้านหลังเลนส์เว้าได้เลย ภาพที่เกิดจากเลนส์เว้าจึงเป็นภาพเสมือนเท่านั้น และจะเป็นภาพที่มีขนาดเล็กกว่าวัตถุเสมอ ไม่ว่าจะวางวัตถุไว้ที่ตำแหน่งใดก็ตาม

11.3.2 การคำนวณเกี่ยวกับเลนส์บาง

ในการอธิบายการเกิดภาพของเลนส์บาง นอกจากใช้วิธีการเขียนรังสีของแสงดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้ว เราสามารถที่จะใช้วิธีการคำนวณจากหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะภาพและระยะวัตถุได้เช่นกัน ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างระยะวัตถุ ระยะภาพ และความยาวโฟกัส เป็นอย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 11.3

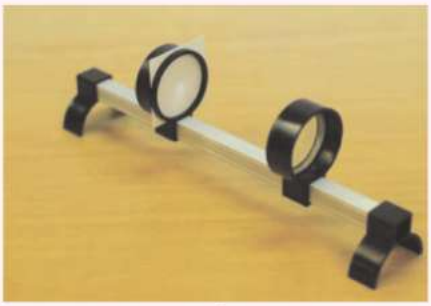
กิจกรรม 11.3 การหักเหของแสงผ่านเลนส์นูน

จุดประสงค์

อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างระยะวัตถุ ระยะภาพ และความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

วัสดุและอุปกรณ์

1. เลนส์นูน 1 อัน
2. ฉากขาว 1 อัน
3. ชุดกล่องแสง 1 ชุด
4. ไม้เมตร 1 อัน



รูป การจัดเครื่องมือสำหรับความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

วิธีทำทดลอง

ตอนที่ 1 การหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

1. จัดเลนส์นูนและฉาก ดังรูป
2. เลื่อนเลนส์นูนไปที่ตำแหน่งปลายสุดของราง
3. จัดเลนส์นูนให้รับแสงจากวัตถุที่อยู่ไกลจากเลนส์นูนมาก ๆ เช่น แสงจากดวงอาทิตย์
4. เลื่อนฉากจนได้ภาพวัตถุคมชัดที่สุดบนฉาก เพื่อวัดความยาวโฟกัสของเลนส์นูน
5. บันทึกความยาวโฟกัส (f) ของเลนส์นูนที่วัดได้

ตอนที่ 2 การหาความสัมพันธ์ระหว่าง ระยะวัตถุ ระยะภาพ และความยาวโฟกัส

1. วางกล่องแสงไว้ที่ปลายข้างหนึ่งของไม้เมตร
2. วางเลนส์นูนบนไม้เมตรให้ห่างจากไส้หลอดไฟของกล่องแสงโดยมีระยะประมาณ 1.5 เท่าของความยาวโฟกัส
3. เลื่อนฉากไปมาจนได้ภาพของไส้หลอดไฟของกล่องแสงบนฉากคมชัดที่สุด
4. วัดระยะวัตถุ (s) ระยะภาพ (s') บันทึกค่าที่ได้ในตาราง
5. ทำการทดลองซ้ำข้อ 2 - ข้อ 4 โดยเลื่อนเลนส์นูนให้ห่างหลอดไฟของกล่องแสงเป็นระยะต่าง ๆ อีก 4 ค่า
6. คำนวณผลรวมของ $\frac{1}{s}$ กับ $\frac{1}{s'}$ แล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้กับ $\frac{1}{f}$

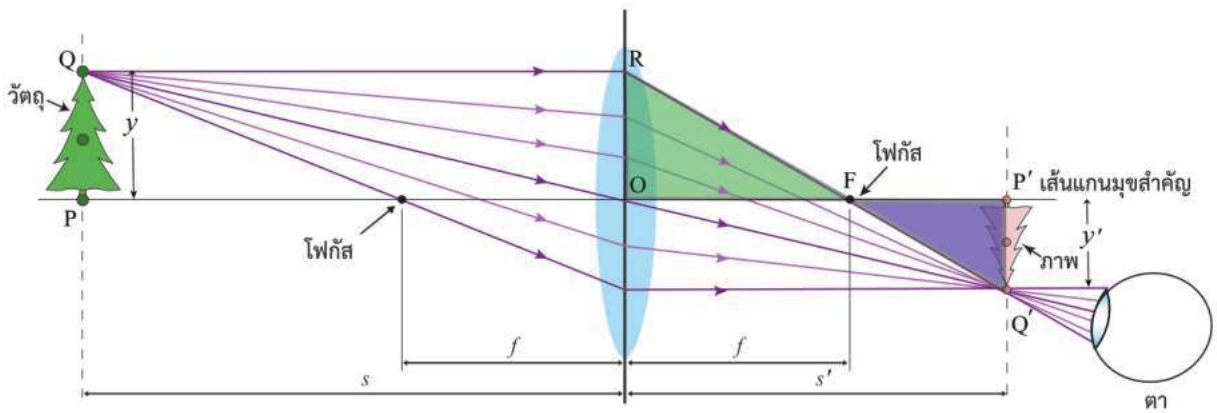
คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ เมื่อเลื่อนเลนส์นูนให้ห่างจากหลอดไฟของกล่องแสงเป็นระยะต่าง ๆ ผลรวมของ $\frac{1}{s}$ กับ $\frac{1}{s'}$ มีค่าเท่ากันทุกครั้งหรือไม่
- ☐ ผลรวมของ $\frac{1}{s}$ กับ $\frac{1}{s'}$ เท่ากับ $\frac{1}{f}$ ทุกครั้งหรือไม่

จากกิจกรรม 11.3 พบว่า ผลบวกของส่วนกลับระยะภาพ $\frac{1}{s}$ กับส่วนกลับระยะวัตถุ $\frac{1}{s'}$ เท่ากับส่วนกลับของความยาวโฟกัส $\frac{1}{f}$ เสมอ เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ คือ

$$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f} \tag{11.6}$$

สมการ (11.6) สามารถอธิบายด้วยการเขียนแผนภาพรังสีของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านเลนส์นูน ดังรูป 11.37 โดยพิจารณารูปสามเหลี่ยมสีเขียวและรูปสามเหลี่ยมสีม่วงซึ่งมีโฟกัสเป็นจุดร่วม จะพบว่า รูปสามเหลี่ยมทั้งสองเป็นสามเหลี่ยมที่คล้ายกันเนื่องจากมีขนาดของมุมภายในทั้ง 3 มุม เท่ากันเป็นคู่ ๆ



รูป 11.37 แผนภาพรังสีแสดงการเกิดภาพจากเลนส์นูน

การที่รูปสามเหลี่ยมสีเขียว ROF และรูปสามเหลี่ยมสีม่วง Q'P'F เป็นรูปสามเหลี่ยมสองรูปที่คล้ายกัน ทำให้อัตราส่วนระหว่างด้านที่สมนัยกันมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{\text{ด้าน OR}}{\text{ด้าน OF}}=\frac{\text{ด้าน P'Q'}}{\text{ด้าน P'F}}$$

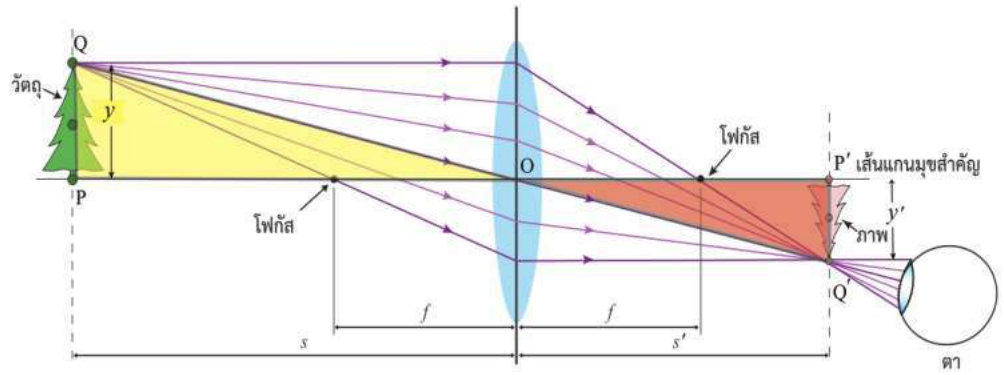
แทนค่าโดยให้ความสูงของภาพมีค่าเป็น $-y'$ เนื่องจากภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพหัวกลับ จะได้

$$\frac{y}{f}=\frac{-y'}{s'-f}$$

จัดรูปใหม่ จะได้

$$\frac{s'-f}{f}=\frac{-y'}{y} \tag{11.7}$$

ซึ่งในทำนองเดียวกัน ถ้าพิจารณาแผนภาพรังสีของแสงแสดงการเกิดภาพจากเลนส์นูนอีกครั้งโดยพิจารณารูปสามเหลี่ยมสีเหลือง PQO และรูปสามเหลี่ยมสีแสด P'Q'O ดังรูป 11.38



รูป 11.38 แผนภาพรังสีของแสงแสดงการเกิดภาพจากเลนส์นูน

จะได้รูปสามเหลี่ยมสีเหลือง PQO และรูปสามเหลี่ยมสีแสด P'Q'O เป็นสามเหลี่ยมคล้าย เนื่องจากมีขนาดของมุมภายในทั้ง 3 มุม เท่ากันเป็นคู่ ๆ ทำให้อัตราส่วนระหว่างด้านที่สมนัยกันมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{\text{ด้าน PQ}}{\text{ด้าน PO}} = \frac{\text{ด้าน P'Q'}}{\text{ด้าน P'O}}$$

แทนค่าและจัดรูปใหม่ จะได้ $\dfrac{-y'}{y} = \dfrac{s'}{s}$ (11.8)

แทน (11.8) ใน (11.7) จะได้ $\dfrac{s'-f}{f} = \dfrac{s'}{s}$

จัดรูป $\dfrac{s'}{f} - 1 = \dfrac{s'}{s}$

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

หารด้วย s' จะได้ $\dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{s} + \dfrac{1}{s'}$

จะได้เช่นเดียวกับ (11.6) คือ $\dfrac{1}{s} + \dfrac{1}{s'} = \dfrac{1}{f}$ เรียกว่า **สมการของเลนส์บาง**

โดยข้อตกลงในเรื่องเครื่องหมายสำหรับการใช้สมการของเลนส์บาง แสดงดังตาราง 11.2

ตาราง 11.2 แสดงการใช้เครื่องหมายสำหรับสมการของเลนส์บาง

ตัวแปร	เครื่องหมาย	คำอธิบาย
s	บวก	เมื่อวัตถุวางอยู่ที่ด้านหน้าเลนส์ ทั้งนี้ การวางวัตถุจริง ๆ จะได้ระยะวัตถุเป็นบวกเสมอ
s'	บวก	เมื่อเกิดภาพ (จริง) ที่ด้านหลังของเลนส์
	ลบ	เมื่อเกิดภาพ (เสมือน) ที่ด้านหน้าของเลนส์
f	บวก	สำหรับเลนส์นูน
	ลบ	สำหรับเลนส์เว้า

หมายเหตุ: s มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าวัตถุอยู่หลังเลนส์ โดยสถานการณ์นี้จะเป็นไปได้เมื่อวัตถุดังกล่าวไม่ใช่วัตถุจริง แต่เป็นวัตถุเสมือนที่เกิดจากการตัดกันของรังสีของแสงที่บริเวณหลังเลนส์ดังกล่าว ซึ่งจะได้เรียนต่อไปในบทเรียนนี้

กำลังขยาย (magnification, M) เท่ากับอัตราส่วนความสูงของภาพ y' ต่อความสูงของวัตถุ y นั่นคือ

$$M = \frac{y'}{y} \tag{11.9}$$

โดย ถ้า M เป็นบวก แสดงว่า y และ y' มีทิศทางเดียวกัน ดังนั้น ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพหัวตั้ง (ภาพเสมือน)

M เป็นลบ แสดงว่า y และ y' มีทิศทางตรงข้ามกัน ดังนั้น ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพหัวกลับ (ภาพจริง)

จากสมการที่ (11.8) นั่นคือ $\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$ ทำให้เราสามารถเขียนสมการ (11.9) ในรูป $M = -\frac{s'}{s}$ ได้อีกด้วย ดังนั้น

กำลังขยาย $$M = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \tag{11.10}$$

โดย ถ้า M เป็นบวก แสดงว่าภาพที่เกิดขึ้นที่หน้าเลนส์ (s' เป็นลบ) และเป็นภาพเสมือนหัวตั้ง

M เป็นลบ แสดงว่าภาพที่เกิดขึ้นที่หลังเลนส์ (s' เป็นบวก) เป็นภาพจริงหัวกลับ

ตัวอย่าง 11.8 จงหาตำแหน่งและชนิดของภาพที่เกิดจากเลนส์นูนความยาวโฟกัส 12 เซนติเมตร เมื่อวางวัตถุสูง 6 มิลลิเมตร ไว้ที่ห่างจากเลนส์นูนเป็นระยะ 36 เซนติเมตร (ตัวอย่างนี้เป็นตัวอย่างเดียวกับตัวอย่าง 11.5)

แนวคิด หาตำแหน่งและชนิดของภาพจาก $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}$ ถ้า s' ที่หาได้เป็น + ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริง แต่ถ้า s' ที่หาได้เป็น – ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพเสมือน

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

แทนค่า จะได้ $$\frac{1}{+36\text{ cm}}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{+12\text{ cm}}$$

$$\frac{1}{s'}=\frac{1}{+12\text{ cm}}-\frac{1}{+36\text{ cm}}$$

$$=\frac{3-1}{+36\text{ cm}}$$

$$=\frac{1}{+18\text{ cm}}$$

ดังนั้น $$s'=+18\,\text{cm}$$

s' มีเครื่องหมาย + แสดงว่าภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริง

ตอบ ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริงหัวกลับและอยู่ด้านหลังเลนส์โดยอยู่ห่างจากเลนส์นูน 18 เซนติเมตร (ซึ่งเป็นค่าที่สอดคล้องกับค่าที่ได้จากการเขียนแผนภาพรังสีของแสงในตัวอย่าง 11.5)

ตัวอย่าง 11.9 ถ้าต้องการใช้เลนส์นูนบางที่มีความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร ทำให้เกิดภาพจริง ที่มีขนาดเล็กกว่าวัตถุ จะต้องวางวัตถุไว้ห่างจากเลนส์บางเป็นระยะทางเท่าใด

แนวคิด หาตำแหน่งของวัตถุจาก $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}$ และ $M=-\frac{s'}{s}$ โดยถ้าเกิดภาพจริงที่มีขนาดเล็กกว่าวัตถุ แสดงว่า กำลังขยาย M จะต้องมีค่าเป็นลบ และน้อยกว่า 1

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

แทนค่า $$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{+10\text{ cm}}$$

แทนค่า $M=-\frac{s'}{s}$ หรือ $s'=-Ms$ จะได้

$$\frac{1}{s}-\frac{1}{Ms}=\frac{1}{+10\text{ cm}}$$

$$\frac{M-1}{Ms}=\frac{1}{+10\text{ cm}}$$

$$(10\text{ cm})M-(10\text{ cm})=Ms$$

$$(10\text{ cm})M-Ms=(10\text{ cm})$$

ดังนั้น $$M=\frac{10\text{ cm}}{10\text{ cm}-s}$$

จากเงื่อนไขในโจทย์ที่ระบุว่า ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริง แสดงว่า กำลังขยาย M ต้องเป็นลบ ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อ $s>10\text{ cm}$ นอกจากนี้โจทย์ยังระบุว่าต้องการภาพที่มีขนาดเล็กกว่าวัตถุ แสดงว่า ขนาดของกำลังขยาย $|M|$ มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง นั่นคือ $|10\text{ cm}-s|>10\text{ cm}$ จะได้ $s>20\text{ cm}$

ตอบ ต้องวางวัตถุห่างจากเลนส์เป็นระยะมากกว่า 20 เซนติเมตร

ตัวอย่าง 11.10 แว่นขยายอันหนึ่งทำจากเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 9 เซนติเมตร ถ้าต้องการใช้แว่นขยายนี้อ่านหนังสือโดยให้ภาพที่เกิดขึ้นมีขนาดโตเป็นสามเท่าของขนาดวัตถุ จะต้องถือแว่นขยายห่างจากหนังสือเท่าใด

แนวคิด หาตำแหน่งของวัตถุจาก $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}$ และ $M=-\frac{s'}{s}$ โดยถ้าเกิดภาพเสมือนที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุสามเท่า แสดงว่า กำลังขยาย M จะต้องมีค่าเป็นบวกและเท่ากับ 3

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

แทนค่า $M=-\frac{s'}{s}$ หรือ $s'=-Ms$ จะได้

$$\frac{1}{s}-\frac{1}{Ms}=\frac{1}{f}$$

แทนค่า จะได้ $$\frac{1}{s}-\frac{1}{3s}=\frac{1}{+9\text{ cm}}$$

$$\frac{3-1}{3s}=\frac{1}{+9\text{ cm}}$$

$$s=+6\text{ cm}$$

s มีเครื่องหมาย + แสดงว่าวัตถุจริงอยู่ที่ด้านหน้าของเลนส์

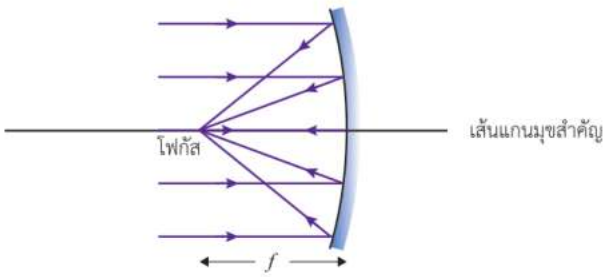
ตอบ ต้องถือแว่นขยายห่างจากหนังสือ 6 เซนติเมตร

11.3.3 การเกิดภาพจากกระจกเงาทรงกลม

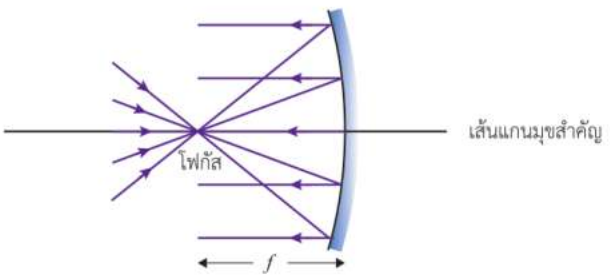
อุปกรณ์อีกชิ้นหนึ่งที่เปลี่ยนเส้นทางของแสงที่เข้าตาเราแล้วทำเกิดภาพของวัตถุในตำแหน่งที่เปลี่ยนไปจากตำแหน่งของวัตถุหรือมีขนาดที่แตกต่างจากขนาดของวัตถุ คือ **กระจกเงาโค้ง** (curved mirror) ซึ่งทำด้วยวัสดุที่สามารถสะท้อนแสงได้ดีเช่นเดียวกับกระจกเงาราบแต่มีผิวโค้ง โดยในระดับนี้ เราจะพิจารณาเฉพาะกระจกเงาโค้งที่มีผิวโค้งเป็นส่วนประกอบของผิวของทรงกลม หรือเรียกว่า **กระจกเงาทรงกลม** (spherical mirror) ซึ่งอาจแบ่งตามลักษณะของผิวได้เป็น**กระจกโค้งนูน** (convex mirror) และ**กระจกโค้งเว้า** (concave mirror) หลักการสำคัญที่ใช้อธิบายการเกิดภาพจากกระจกชนิดนี้ยังคงเป็นกฎการสะท้อน ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยการอธิบายสิ่งที่เกิดขึ้นกับกระจกโค้งเว้า

ภาพที่เกิดจากกระจกโค้งเว้า

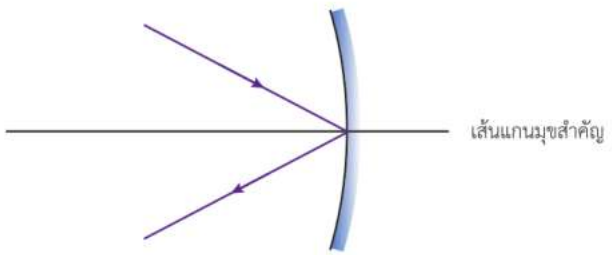
ในการศึกษากระจกโค้งเว้ามีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ศูนย์กลางความโค้ง กึ่งกลางกระจก โฟกัส และเส้นแกนมุขสำคัญ โดยโฟกัสอยู่ที่ครึ่งทางระหว่างกึ่งกลางกระจกกับศูนย์กลางความโค้ง นั่นคือ รัศมีความโค้งเท่ากับสองเท่าของความยาวโฟกัส และเส้นแกนมุขสำคัญคือเส้นสมมุติที่ผ่านศูนย์กลางความโค้งและกึ่งกลางกระจก แต่รังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญจะสะท้อนกระจกโค้งเว้าในลักษณะลู่เข้าไปยังโฟกัสของกระจกโค้งเว้าที่อยู่ด้านหน้าของกระจก ลักษณะสำคัญในการสะท้อนของแสงโดยกระจกโค้งเว้า แสดงดังรูป 11.39



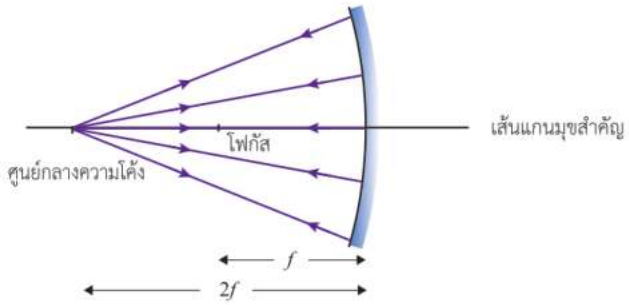
ก. รังสีของแสงที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ จะสะท้อนกระจกโค้งเว้าโดยมีแนวผ่านไปยังโฟกัส



ข. รังสีของแสงที่มีแนวผ่านโฟกัสด้านหน้าเลนส์ จะสะท้อนกระจกโค้งเว้าออกมาเป็นรังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ



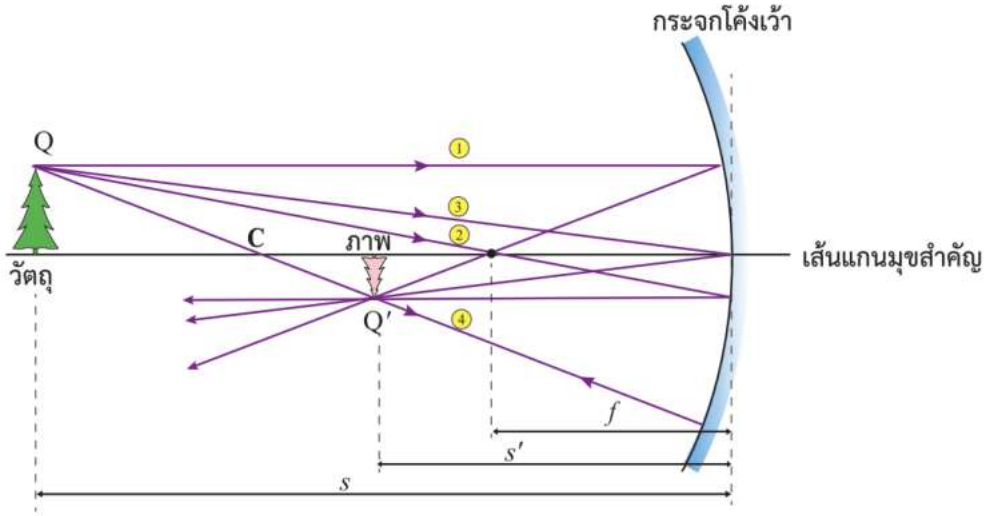
ค. รังสีของแสงที่ตกกระทบกึ่งกลางของกระจกโค้งเว้าพอดีจะสะท้อนลงมาที่อีกด้านหนึ่งของเส้นแกนมุขสำคัญ โดยมีเส้นแกนมุขสำคัญเป็นเส้นแนวฉากในกฎการสะท้อน



ง. รังสีของแสงที่มีแนวผ่านศูนย์กลางความโค้ง จะสะท้อนกระจกโค้งเว้าโดยย้อนกลับทางเดิม

รูป 11.39 การสะท้อนของแสงจากกระจกโค้งเว้า

ในการหาตำแหน่งของภาพที่เกิดจากกระจกโค้งเว้า เราสามารถใช้การเขียนแผนภาพรังสี โดยเริ่มต้นจากการเขียนรังสีที่ออกจากส่วนหัวของวัตถุมายังกระจกโค้งเว้า ดังรูป 11.40



รูป 11.40 การเขียนรังสีของแสงเพื่อแสดงการเกิดภาพจากกระจกโค้งเว้า

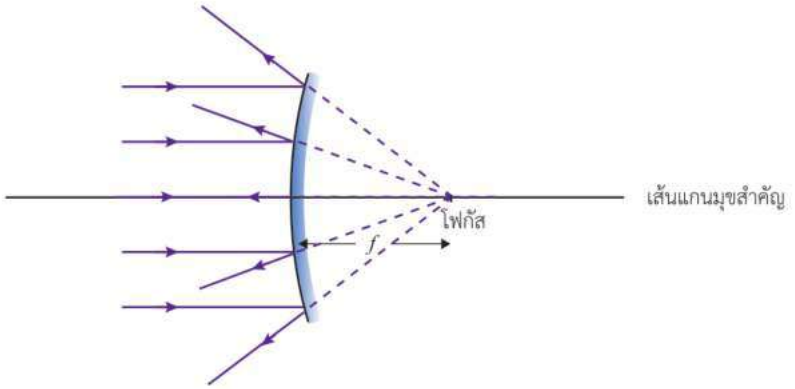
การหาตำแหน่งของภาพจากวัตถุที่ตั้งฉากบนแกนมุขสำคัญ จากการเขียนแผนภาพรังสีของแสง ตามรูป 11.40 โดยใช้วิธีการเขียนรังสีของแสงให้สะท้อนกับเส้นตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ ณ จุดกึ่งกลางของกระจกโค้งเว้า มีหลักการดังนี้

1. รังสีของแสงที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญจะสะท้อนกระจกโค้งเว้าแล้วผ่านโฟกัส
2. รังสีของแสงที่ผ่านโฟกัสจะสะท้อนกระจกโค้งเว้าออกมาเป็นรังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ
3. รังสีของแสงที่ตกกระทบกึ่งกลางกระจกโค้งเว้าพอดีจะสะท้อนลงมาที่อีกด้านหนึ่งของเส้นแกนมุขสำคัญ โดยมีเส้นแกนมุขสำคัญเป็นเส้นแนวฉากในกฎการสะท้อน
4. รังสีของแสงที่ผ่านศูนย์กลางความโค้ง จะสะท้อนกระจกโค้งเว้าโดยย้อนกลับทางเดิม

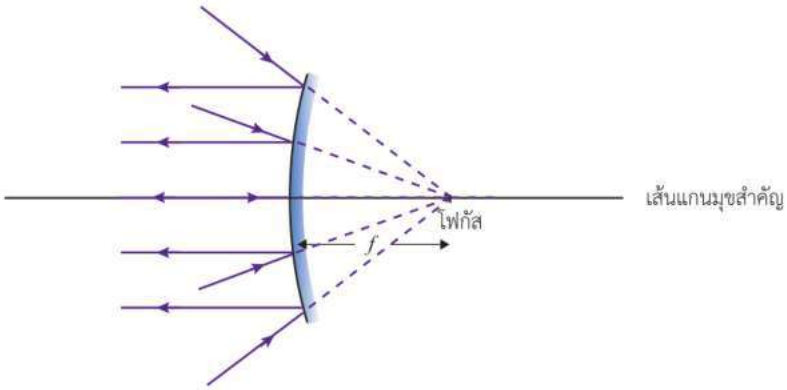
จากรูป 11.40 จะเห็นว่า แสงเดินทางมาตัดกันจริง ทำให้ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพจริงหัวกลับ ซึ่งเหมือนกับกรณีของการเกิดภาพจริงหัวกลับจากเลนส์นูน แต่สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ ภาพจริงที่เกิดจากกระจกเว้าจะเกิดด้านเดียวกับวัตถุซึ่งเป็นด้านหน้าของกระจกโค้งเว้า แต่ภาพจริงที่เกิดจากเลนส์นูนจะเกิดคนละด้านกับวัตถุซึ่งเป็นด้านหลังของกระจกโค้งเว้า

ภาพที่เกิดจากกระจกโค้งนูน

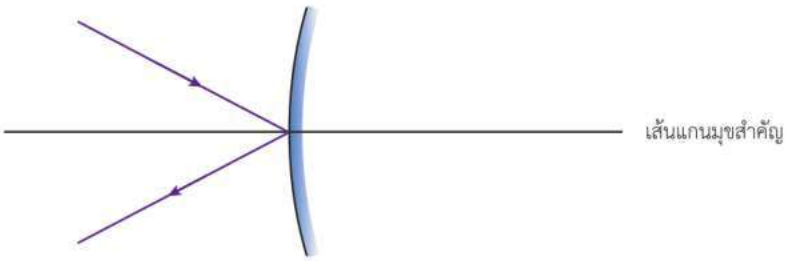
กระจกโค้งนูน มีส่วนประกอบเช่นเดียวกันกับกระจกโค้งเว้า คือ ศูนย์กลางความโค้ง กึ่งกลางกระจก โฟกัส และเส้นแกนมุขสำคัญ ซึ่งเส้นแกนมุขสำคัญคือเส้นสมมุติที่ผ่านศูนย์กลางความโค้งและกึ่งกลางกระจก แต่รังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญจะสะท้อนกระจกโค้งนูนในลักษณะบานออก โดยแสงที่บานออกจะเสมือนว่าบานออกจากโฟกัสของกระจกโค้งนูนซึ่งอยู่ด้านหลังกระจก ลักษณะสำคัญในการสะท้อนของแสงโดยกระจกโค้งนูน แสดงดังรูป 11.41



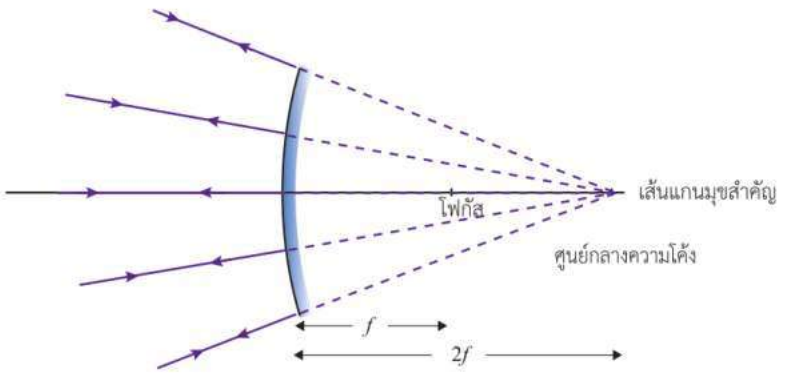
ก. รังสีของแสงที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญจะสะท้อนกระจกโค้งนูนเสมือนว่าออกมาจากโฟกัสที่อยู่หลังกระจก



ข. รังสีของแสงที่มีแนวผ่านโฟกัสด้านหลังกระจกโค้งนูนจะสะท้อนเป็นรังสีที่ขนานแกนมุขสำคัญ



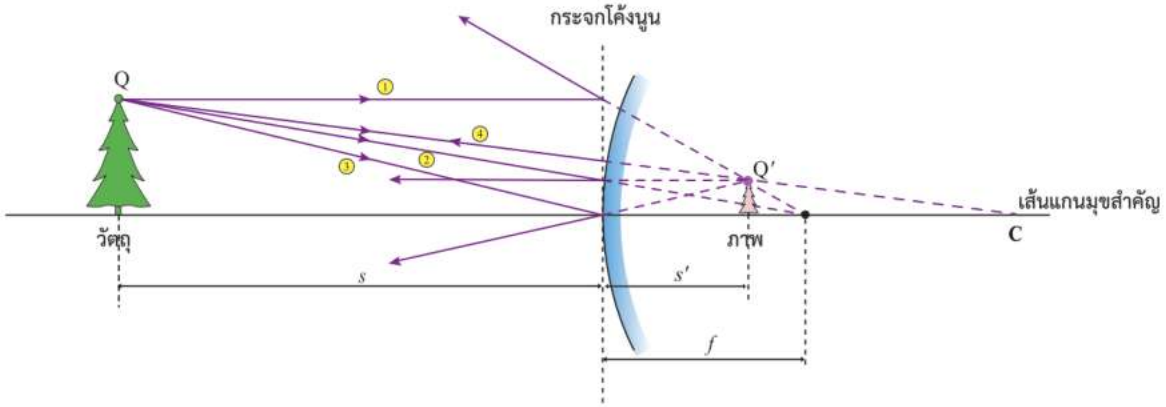
ค. รังสีของแสงที่ตกกระทบกึ่งกลางของกระจกโค้งนูนพอดีจะสะท้อนลงมาที่อีกด้านหนึ่งของเส้นแกนมุขสำคัญ โดยมีเส้นแกนมุขสำคัญเป็นเส้นแนวฉากในกฎการสะท้อน



ง. รังสีของแสงที่มีแนวผ่านศูนย์กลางความโค้งที่อยู่ด้านหลังกระจกโค้งนูนจะสะท้อนย้อนกลับทางเดิม

รูปที่ 11.41 การสะท้อนของแสงจากกระจกโค้งนูน

ในการหาตำแหน่งของภาพที่เกิดจากกระจกโค้งนูนด้วยการเขียนแผนภาพรังสีของแสง สามารถทำได้โดยการเขียนรังสีของแสงจำนวน 4 เส้น ในทำนองเดียวกันกับกระจกโค้งเว้า ดังรูป 11.42



รูป 11.42 การเขียนรังสีของแสงเพื่อแสดงการเกิดภาพจากกระจกโค้งนูน

การหาตำแหน่งของภาพจากวัตถุที่ตั้งฉากบนแกนมุขสำคัญจากการเขียนแผนภาพรังสีของแสง ตามรูป 11.42 โดยใช้วิธีการเขียนรังสีของแสงให้สะท้อนกับเส้นตั้งฉากกับแกนมุขสำคัญ ณ จุดกึ่งกลางของกระจกโค้งนูน มีหลักการดังนี้

1. รังสีของแสงที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญจะสะท้อนกระจกโค้งนูนเสมือนว่าออกมาจากโฟกัสที่อยู่หลังกระจก
2. รังสีของแสงที่มีแนวผ่านโฟกัสด้านหลังกระจกจะสะท้อนกระจกโค้งนูนออกมาเป็นรังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ
3. รังสีของแสงที่ตกกระทบกึ่งกลางกระจกโค้งนูนพอดีจะสะท้อนลงมาที่อีกด้านหนึ่งของเส้นแกนมุขสำคัญ โดยมีเส้นแกนมุขสำคัญเป็นเส้นแนวฉากในกฎการสะท้อน
4. รังสีของแสงที่มีแนวผ่านศูนย์กลางความโค้งด้านหลังกระจกจะสะท้อนกระจกโค้งนูนโดยย้อนกลับทางเดิม

จากรูป 11.42 จะเห็นว่าแสงที่ออกจากจุด Q หลังจากสะท้อนกระจกจะบานออก ซึ่งถ้าแสงนี้เข้าตาเรา เราจะบอกว่า แสงนี้มาจากจุด Q′ ซึ่งอยู่ที่ด้านหลังกระจก และเป็นจุดที่แสงไม่ได้ไปตัดกันจริง ๆ ภาพที่เกิดขึ้นจึงเป็นภาพเสมือน

ข้อสังเกต

การเขียนรังสีของแสงเพื่อแสดงการเกิดภาพของกระจกโค้งเว้าและกระจกโค้งนูนดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถลดขั้นตอนได้โดยการเขียนรังสีเพียง 3 เส้น ซึ่งจะทำให้ได้ข้อมูลที่เพียงพอต่อการแสดงการเกิดภาพจากกระจกโค้งเว้าและกระจกโค้งนูน

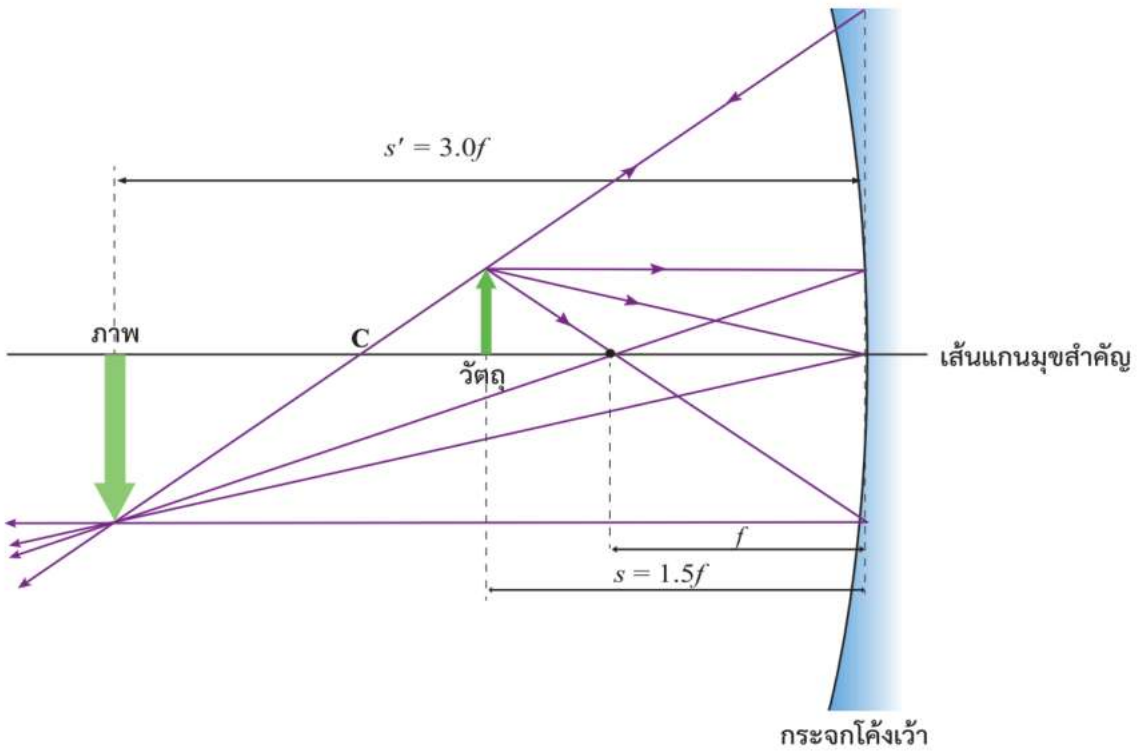
ตัวอย่าง 11.11 จงเขียนแผนภาพรังสีของแสงเพื่อแสดงตำแหน่งและชนิดของภาพที่เกิดขึ้นหน้ากระจกโค้งเว้า ดังนี้

ก. วางวัตถุที่ระยะ 1.5 เท่าของความยาวโฟกัสของกระจกโค้งเว้า

ข. วางวัตถุที่ระยะ 0.5 เท่าของความยาวโฟกัสของกระจกโค้งเว้า

แนวคิด กำหนดสเกลที่เหมาะสมกับระยะต่างๆ โจทย์กำหนด และเขียนวัตถุบนเส้นแกนมุขสำคัญ จากนั้นเขียนรังสีของแสงจากส่วนปลายบนของวัตถุเพื่อหาจุดตัดของรังสีทั้ง 4 เส้น คือ รังสีที่ขนานกับเส้นแกนมุขสำคัญ รังสีที่ผ่านโฟกัสด้านใกล้วัตถุ รังสีของแสงที่ตกกระทบกึ่งกลางกระจกโค้งเว้าพอดี และรังสีของแสงผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง โดยหากรังสีทั้งสี่สะท้อนกระจกแล้วจะถ่างออกจากกัน จะต้องลากเส้นรังสีย้อนเป็นเส้นตรงไปตัดกันที่หลังกระจกโค้งเว้า

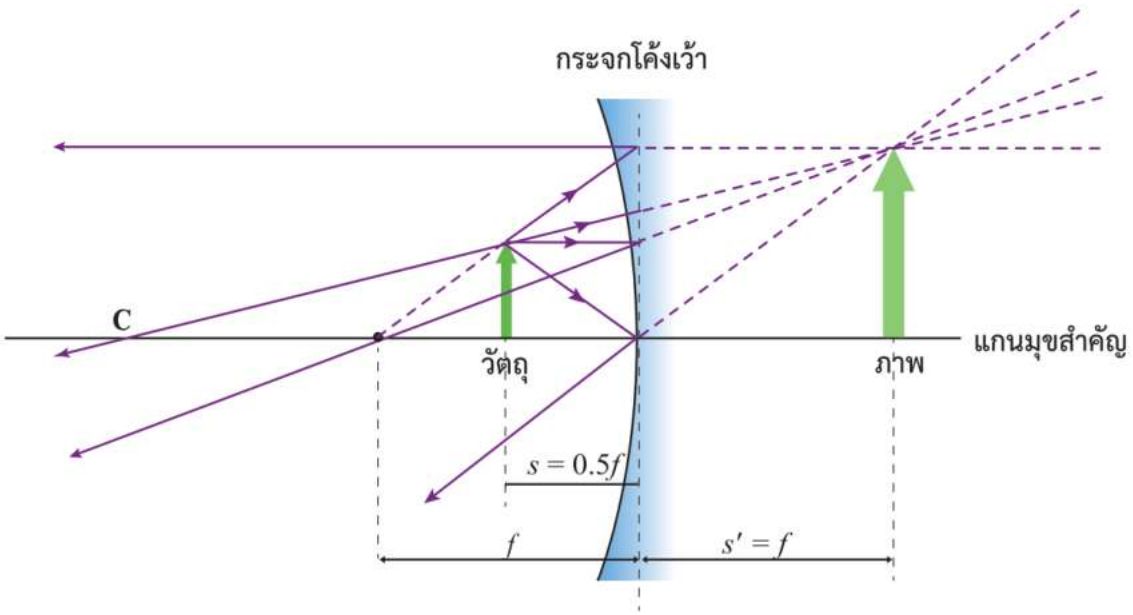
ก. วิธีทำ เขียนแผนภาพรังสีของแสง โดยวัตถุตั้งอยู่ห่างจากกระจกโค้งเว้าเป็นระยะ $1.5f$ ได้ดังนี้



รังสีทั้งสี่จะไปตัดกันที่ตำแหน่งที่หน้ากระจกโค้งเว้า โดยภาพเกิดขึ้นที่ระยะภาพเท่ากับ $3.0f$

ตอบ ภาพที่เกิดจากกระจกโค้งเว้าอยู่หน้ากระจกและห่างจากกึ่งกลางกระจกโค้งเว้าเป็นระยะทางเท่ากับ $3.0f$

ข. วิธีทำ แขียนแผนภาพรังสีของแสง โดยวัตถุตั้งอยู่ห่างจากระจกเป็นระยะ $0.5f$ ได้ดังนี้



รังสีทั้งสี่จะไปตัดกันที่ตำแหน่งที่หลังกระจกโค้งเว้า โดยภาพเกิดขึ้นที่ระยะภาพเท่ากับ f

ตอบ ภาพที่เกิดจากกระจกโค้งเว้าอยู่หลังกระจกและห่างจากกึ่งกลางกระจกโค้งเว้าเป็นระยะทางเท่ากับ f

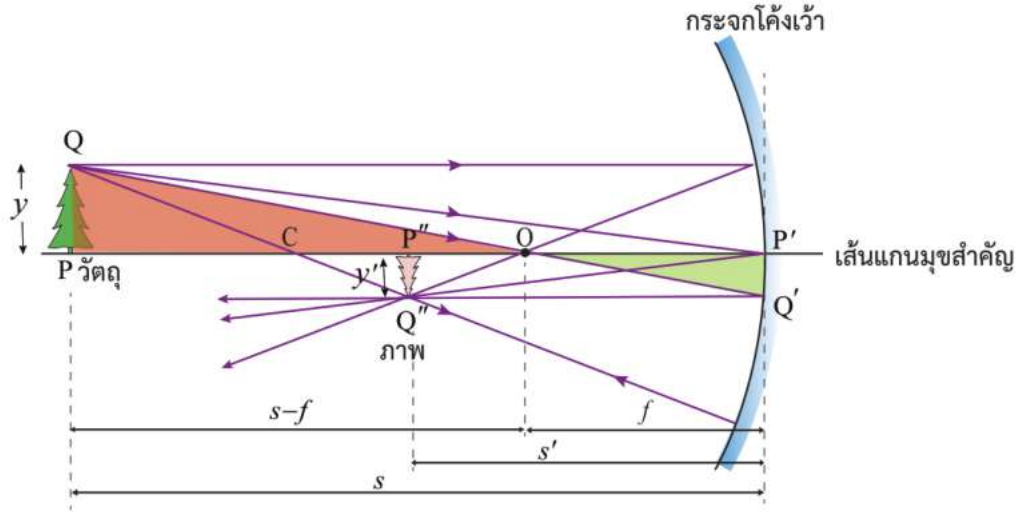
จากตัวอย่าง 11.11 จะเห็นได้ว่า ภาพที่เกิดจากกระจกโค้งเว้าขึ้นกับตำแหน่งการวางวัตถุ ซึ่งในกรณี ก. จะได้ภาพจริง แต่ในกรณี ข.จะได้ภาพเสมือน

ชวนคิด

จากตัวอย่าง 11.11 ถ้าเปลี่ยนเป็นกระจกโค้งนูน ระยะวัตถุจะมีผลต่อชนิดของภาพที่เกิดขึ้นหรือไม่

11.3.4 การคำนวณเกี่ยวกับกระจกเงาทรงกลม

นอกจากการเขียนแผนภาพรังสีเพื่อหาตำแหน่งของภาพที่เกิดจากกระจกโค้งทรงกลมแล้ว เรายังสามารถใช้กฎการสะท้อนในการพิสูจน์สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะภาพ ระยะวัตถุ และความยาวโฟกัสของกระจกโค้งได้ โดยเริ่มต้นด้วยการเขียนแผนภาพรังสีของแสงที่แสดงการเกิดภาพจริงจากกระจกโค้งเว้า ดังรูป 11.43



รูป 11.43 รังสีของแสงสำหรับใช้พิสูจน์สมการของกระจกโค้งเว้า

พิจารณารูปสามเหลี่ยมสีแดง POQ และรูปสามเหลี่ยมสีเขียว P'OQ' เป็นสามเหลี่ยมคล้าย เนื่องจากมีขนาดของมุมภายในทั้ง 3 มุม เท่ากันเป็นคู่ ๆ ทำให้อัตราส่วนระหว่างด้านที่สมนัยกันมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{\text{ด้าน P'Q'}}{\text{ด้าน PQ}} = \frac{\text{ด้าน P'O}}{\text{ด้าน PO}}$$

แทนค่า

$$\frac{y'}{y} = \frac{f}{s-f} \qquad (11.11)$$

ในทำนองเดียวกัน สามเหลี่ยม PP'Q และสามเหลี่ยม P"P'Q" เป็นสามเหลี่ยมคล้าย ทำให้อัตราส่วนระหว่างด้านที่สมนัยกันมีค่าเท่ากัน นั่นคือ

$$\frac{\text{ด้าน P"Q"}}{\text{ด้าน PQ}} = \frac{\text{ด้าน P'P"}}{\text{ด้าน P'P}}$$

แทนค่า

$$\frac{|y'|}{|y|} = \frac{|s'|}{|s|} \qquad (11.12)$$

เนื่องจาก (11.11) = (11.12) จะได้ $\frac{s'}{s} = \frac{f}{s-f}$

จัดรูปแบบใหม่ จะได้ $\frac{s-f}{s} = \frac{f}{s'}$

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

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

ดังนั้น
$$\frac{1}{s}+\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \qquad (11.13)$$

ทั้งนี้ ข้อตกลงเรื่องเครื่องหมายของการใช้สมการนี้ คือ

s เป็นบวก เมื่อวัตถุอยู่ด้านหน้ากระจกโค้ง

s' เป็นบวก เมื่อเกิดภาพจริงที่ด้านหน้ากระจกโค้ง
เป็นลบ ถ้าเกิดภาพเสมือนที่ด้านหลังของกระจกโค้ง

f เป็นบวก สำหรับกระจกโค้งเว้า
เป็นลบ สำหรับกระจกโค้งนูน

ข้อสังเกต

สมการ (11.13) ซึ่งเป็นสมการสำหรับกระจกโค้งทรงกลมนั้นมีรูปแบบสมการที่เหมือนกับสมการเลนส์บาง แต่ควรระมัดระวังการกำหนดเครื่องหมายสำหรับความยาวโฟกัส เพราะความยาวโฟกัสเป็นบวกในกรณีเลนส์นูนและกระจกโค้งเว้า แต่เป็นลบในกรณีเลนส์เว้าและกระจกโค้งนูน

กำลังขยาย สามารถพิจารณาเครื่องหมายในทำนองเดียวกันกับเลนส์บาง ได้ดังนี้

$$M = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \qquad (11.14)$$

โดยถ้า M เป็นบวก แสดงว่าภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพหัวตั้ง (ภาพเสมือน)

M เป็นลบ แสดงว่าภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพหัวกลับ (ภาพจริง)

ตัวอย่าง 11.12 นักเรียนคนหนึ่งมองด้านในของช้อนคันหนึ่งซึ่งมีลักษณะคล้ายกระจกโค้งเว้าที่มีความยาวโฟกัส 5 เซนติเมตร ถ้าเขาถือช้อนนี้ห่างจากตาของเขาเป็นระยะ 30 เซนติเมตร เขาจะเห็นหน้าตัวเองมีระยะห่างจากตาของเขากี่เซนติเมตร

แนวคิด หาตำแหน่งของวัตถุจาก $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}$ โดยที่วัตถุคือหน้าของนักเรียนคนนี้อยู่ห่างจากกระจกโค้งเว้าเท่ากับ 30 เซนติเมตร นั่นคือ $s=+30\ \text{cm}$ และความยาวโฟกัส $f=+5\ \text{cm}$

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

แทนค่า จะได้
$$\frac{1}{+30\ \text{cm}}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{+5\ \text{cm}}$$

$$\frac{1}{s'}=\frac{1}{+5\ \text{cm}}-\frac{1}{+30\ \text{cm}}$$

$$\frac{1}{s'}=\frac{6-1}{30\ \text{cm}}$$

$$\frac{1}{s'}=\frac{5}{30\ \text{cm}}$$

$$s'=+6\,\text{cm}$$

s' มีเครื่องหมายเป็นบวก แสดงว่าเป็นภาพจริงที่เกิดด้านหน้าของกระจกโค้งเว้า ซึ่งอยู่ระหว่างตาของเขาและกระจก ดังนั้น ภาพนี้จะอยู่ห่างจากตาของเขาเป็นระยะทาง 30 cm – 6 cm เท่ากับ 24 cm

ตอบ เขาจะเห็นหน้าตัวเองโดยห่างจากตาของเขาเป็นระยะทาง 24 เซนติเมตร

ชวนคิด

จากตัวอย่าง 11.12 จงเขียนแผนภาพรังสีของแสงเพื่อแสดงการเกิดภาพ

ตัวอย่าง 11.13 กระจกมองข้างหลังของรถยนต์เป็นกระจกโค้งนูน ที่มีความยาวโฟกัส 8 เมตร ถ้ามีรถบรรทุกขับตามมาและอยู่ห่างออกไป 30 เมตร เมื่อเทียบกับกระจกมองข้างหลังรถยนต์ คนขับรถยนต์คันนี้จะมองเห็นภาพรถบรรทุกเป็นภาพลักษณะใด เกิดที่ตำแหน่งใด และมีกำลังขยายเท่าใด

แนวคิด หาตำแหน่งของวัตถุจาก $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}$ โดยที่วัตถุคือรถบรรทุกซึ่งอยู่ห่างจากกระจกโค้งนูนเท่ากับ 30 เมตร นั่นคือ $s=+30\ \text{m}$ และความยาวโฟกัส $f=-8\ \text{m}$ จากนั้นหากำลังขยายจาก $M=-\frac{s'}{s}$

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

โดยแทนค่า จะได้ $$\frac{1}{+30\ \text{m}}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{-8\ \text{cm}}$$

$$\frac{1}{s'}=\frac{1}{-8\ \text{m}}-\frac{1}{+30\ \text{m}}$$

$$\frac{1}{s'}=\frac{-30-8}{240\ \text{m}}$$

$$\frac{1}{s'}=-\frac{38}{240\ \text{m}}$$

$$s'=-6.3\ \text{m}$$

s' มีเครื่องหมายเป็นลบ แสดงว่าเป็นภาพเสมือนหัวตั้งที่เกิดด้านหลังของกระจกโค้งนูนเป็นระยะ 6.3 เมตร

หากำลังขยายจาก $$M=-\frac{s'}{s}$$

แทนค่า $$M=-\frac{(-6.3\ \text{m})}{+30\ \text{m}}$$

จะได้ $$M=+0.21$$

M มีขนาดน้อยกว่าหนึ่ง แสดงว่า ภาพที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าวัตถุจริง

ตอบ เกิดภาพเสมือนหัวตั้งอยู่ด้านหลังของกระจกโค้งนูนโดยห่างจากผิวกระจกไปทางด้านหน้ารถเป็นระยะ 6.3 เมตร และภาพที่เกิดขึ้นมีขนาดเล็กกว่าวัตถุจริงโดยมีกำลังขยายเท่ากับ 0.21

ความรู้เพิ่มเติม

ในกรณีกระจกเงาทรงกลมขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับรัศมีความโค้งของกระจก รังสีที่ขนานเส้นแกนมุขสำคัญที่ตกกระทบกระจกเงาทรงกลมแล้วสะท้อนจะไม่ตัดที่จุดเดียวกัน โดยแสงขนานที่ตกกระทบใกล้กึ่งกลางกระจกเงาทรงกลมจึงจะสะท้อนมาตัดกันที่จุดหนึ่งบนเส้นแกนมุขสำคัญ ส่วนรังสีขนานเส้นแกนมุขสำคัญที่ตกกระทบตำแหน่งอื่นที่ห่างกึ่งกลางกระจกออกไปจะมีจุดตัดเลื่อนไปจากจุดเดิม ทำให้ในกรณีกระจกเงาทรงกลมขนาดใหญ่จะมีตำแหน่งโฟกัสของกระจกไม่อยู่ที่จุดเดียว ดังนั้นกระจกเงาทรงกลมที่กล่าวถึงในบทนี้จึงหมายถึงกระจกเงาทรงกลมที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับรัศมีความโค้งของกระจก หากต้องการใช้งานกระจกเงาทรงกลมขนาดใหญ่ที่มีโฟกัสแน่นอนไม่ว่าแสงจะกระทบที่ตำแหน่งใดบนกระจก จะต้องใช้กระจกเงาทรงโค้งพาราโบลาเมื่อพิจารณาในสองมิติ หรือเป็นกระจกเงาทรงโค้งพาราโบลอยด์เมื่อพิจารณาในสามมิติ

ความรู้เรื่องกระจกทรงโค้งพาราโบลอยด์และการสะท้อนของรังสีขนานมายังโฟกัสนั้นไม่ได้จำกัดอยู่แค่เรื่องการสะท้อนของแสงที่ตามองเห็นเท่านั้น การรับส่งสัญญาณคลื่นไมโครเวฟจากดาวเทียมมายังโลกก็ใช้สัญญาณในลักษณะที่คล้ายแสงขนาน จึงได้มีการออกแบบให้จานรับสัญญาณคลื่นไมโครเวฟที่พื้นดินมีผิวสะท้อนเป็นผิวโค้งพาราโบลอยด์และมีตัวอุปกรณ์สำหรับรับสัญญาณคลื่นไมโครเวฟอยู่ที่โฟกัส ดังรูป

รูป จานรับสัญญาณคลื่นไมโครเวฟ

ในสมัยก่อน การทำกระจกเงาโค้งให้เป็นผิวโค้งพาราโบลอยด์ทำได้ค่อนข้างยาก กระจกเงาโค้งส่วนใหญ่จึงมีผิวโค้งเป็นผิวทรงกลม ทำให้มีการใช้คำว่า “กระจกเงาทรงกลม” ในหัวข้อเรื่องการสะท้อนแสง นอกจากนี้ การวิเคราะห์ในเชิงทฤษฎีจากผิวโค้งทรงกลมจะง่ายกว่าผิวโค้งพาราโบลอยด์ จึงทำให้ปรากฏคำว่า “รัศมีความโค้งของกระจก” หรือ “จุดศูนย์กลางความโค้ง” แต่ในปัจจุบันเราสามารถทำผิวสะท้อนเป็นผิวโค้งพาราโบลอยด์ได้ไม่ยากนัก ทำให้การออกแบบจานดาวเทียมหรือกระจกโค้งเว้าในกล้องโทรทรรศน์ส่วนใหญ่เป็นผิวโค้งพาราโบลอยด์ทั้งสิ้น อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานที่ไม่ได้ต้องการความละเอียดมากนัก เราสามารถใช้กระจกเงาทรงกลมที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับรัศมีของทรงกลมได้ ซึ่งในกรณีดังกล่าวจะพบว่า ความยาวโฟกัสของกระจกเงาทรงกลมนั้นมีค่าประมาณครึ่งหนึ่งของรัศมีของทรงกลมนั้น

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 11.3

1. กระจกติดรถยนต์สำหรับใช้ดูยานพาหนะที่อยู่ข้างหลัง มักจะเป็นกระจกโค้งนูน
2. เหตุใด ทันตแพทย์จึงใช้กระจกโค้งเว้าส่องดูฟันคนไข้
3. ถ้าระยะวัตถุมากกว่าความยาวโฟกัสแต่น้อยกว่าสองเท่าของความยาวโฟกัสของเลนส์นูน จะได้ภาพชนิดใด และมีขนาดเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าขนาดวัตถุ

แบบฝึกหัด 11.3

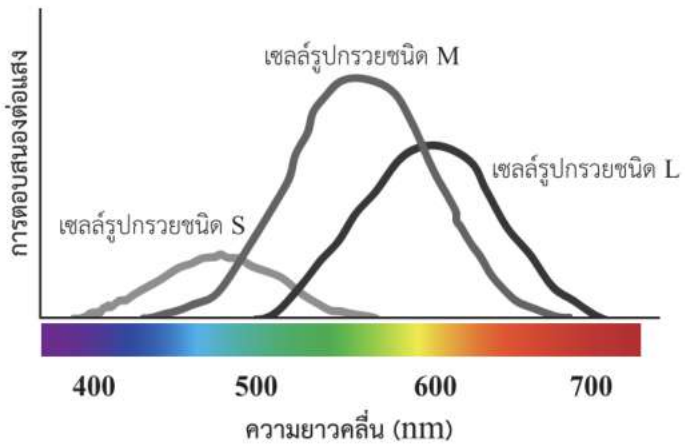
1. วางวัตถุหน้าเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 10.0 เซนติเมตร ให้ห่างจากเลนส์นูน 30 เซนติเมตร จงหาระยะภาพ ชนิดของภาพ และกำลังขยายของภาพ ด้วยวิธีดังนี้
   ก. การเขียนแผนภาพรังสีของแสง
   ข. การคำนวณ
2. วางวัตถุไว้หน้ากระจกโค้งนูนที่มีรัศมีความโค้ง 24 เซนติเมตร ให้ห่างจากกระจกโค้งนูน 20 เซนติเมตร จงหาระยะภาพ ชนิดของภาพ และกำลังขยายของภาพ ด้วยวิธีดังนี้
   ก. การเขียนแผนภาพรังสีของแสง
   ข. การคำนวณ
3. เทียนไขสูง 4 เซนติเมตร ตั้งอยู่บนเส้นแกนมุขสำคัญของกระจกโค้งเว้าที่มีความยาวโฟกัส 10 เซนติเมตร ทำให้เกิดภาพหน้ากระจกโค้งเว้าห่างจากกระจกโค้งเว้า 15 เซนติเมตร เทียนไขอยู่ห่างจากกระจกโค้งเว้ากี่เซนติเมตร และภาพเทียนไขสูงกี่เซนติเมตร

11.4 แสงสีและการมองเห็นแสงสี

การเห็นสีของมนุษย์แต่ละคนมีความแตกต่างกัน ในงานการผลิตสิ่งของที่มีสีตามที่กำหนด เช่น รถยนต์ เสื้อผ้า จึงไม่ใช้ตาของมนุษย์ในการระบุสี แต่ใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ในการจำแนกและผสมสีได้อย่างแม่นยำโดยใช้รหัสการผสมและจำแนกสี เช่น ใช้ RGB code ในงานผสมแสงสี และใช้ CMYK code ในงานผสมสารสี สำหรับการศึกษาในหัวข้อนี้เกี่ยวกับการมองเห็นสีของมนุษย์ สีของแสงสี และการผสมแสงสี สีของสารสีและการผสมสารสี

11.4.1 การมองเห็นสีของมนุษย์

มนุษย์มองเห็นสีต่าง ๆ เป็นเพราะมีแสงสีตกกระทบบนจอตา ซึ่งมีเซลล์รูปกรวย (cone cell) 3 ชนิด คือ ชนิด S ชนิด M และ ชนิด L เซลล์รูปกรวยแต่ละชนิดจะมีการตอบสนองต่อแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป โดยตัวย่อ S M L หมายถึง ช่วงความยาวคลื่นที่เซลล์รูปกรวยแต่ละชนิดตอบสนอง ซึ่งคือ **ความยาวคลื่นสั้น** (Short wavelength) **ความยาวคลื่นกลาง** (Medium wavelength) และ **ความยาวคลื่นยาว** (Long wavelength) ตามลำดับ ดังรูป



รูป 11.44 การตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ของเซลล์รูปกรวยแต่ละชนิด

ความน่าสนใจของระบบการมองเห็นของมนุษย์ คือ การที่ตาสามารถมองเห็นสีได้จำนวนมากมายหลายสีจากการทำงานร่วมกันของเซลล์รูปกรวยในตามนุษย์เพียง 3 ชนิดเท่านั้น ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาจากรูป 11.44 จะพบว่า เซลล์รูปกรวยทั้ง 3 ชนิดมีการตอบสนองต่อแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่แตกต่างกัน โดยเซลล์รูปกรวยชนิด L ซึ่งทำงานและส่งสัญญาณไปยังสมอง ถ้ามีแสงความยาวคลื่น 500-700 นาโนเมตร ตกกระทบ เช่น แสงความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร (สีเขียว) 580 นาโนเมตร (สีเหลือง) และ 650 นาโนเมตร (สีแดง) ซึ่งกระตุ้นให้เซลล์รูปกรวยชนิด L ตอบสนอง แต่จะไม่สามารถแยกแยะสีของแสงได้

การแยกแยะสีของแสงจำเป็นจะต้องมีเซลล์รูปกรวยชนิด M และ S ทำงานร่วมด้วย โดยเซลล์รูปกรวยชนิด M จะตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 430-650 นาโนเมตร ซึ่งในกรณีที่มีแสง

ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร มาตกกระทบจอตา เซลล์รูปกรวยทั้ง M และ L จะตอบสนองเท่า ๆ กัน ทำให้สมองของเราแปลความหมายว่า มองเห็นแสงสีเหลือง แต่ถ้าเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากกว่านี้ เช่น 600 นาโนเมตร ซึ่งเซลล์รูปกรวย M และ L ก็ยังตอบสนองทั้งคู่ แต่เซลล์รูปกรวยชนิด L จะตอบสนองมากกว่า สมองเราจะแปลความหมายว่า มองเห็นแสงสีแสด และถ้าแสงความยาวคลื่นมากขึ้นอีก เช่น แสงความยาวคลื่น 670 นาโนเมตร มาตกกระทบ เซลล์รูปกรวยชนิด L ก็จะทำงาน ส่วนเซลล์รูปกรวยชนิด M แทบจะไม่ตอบสนองแล้ว สมองของเราก็จะแปลความหมายว่า มองเห็นแสงสีแดง

ในทำนองเดียวกัน เซลล์รูปกรวยชนิด S จะตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-560 นาโนเมตร ซึ่งถ้าหากมีแสงความยาวคลื่นแสง 500 นาโนเมตร มาตกกระทบจอตา จะทำให้เซลล์รูปกรวยชนิด M และ S ตอบสนองเท่า ๆ กัน แต่เซลล์รูปกรวยชนิด L แทบจะไม่ตอบสนอง สมองของเราก็จะแปลความหมายว่า มองเห็นแสงสีฟ้าอมเขียว และถ้ามีแสงที่ความยาวคลื่นน้อยกว่า 500 นาโนเมตร จะทำให้เซลล์รูปกรวยชนิด S ตอบสนองมากกว่าเซลล์รูปกรวยชนิด M เช่น สำหรับแสงสีที่มีความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร จะมองเห็นเป็นแสงสีน้ำเงิน และสำหรับแสงสีที่มีความยาวคลื่น 420 นาโนเมตร จะมองเห็นเป็นแสงสีม่วง

การตอบสนองของเซลล์รูปกรวยทั้ง 3 ชนิด ทำให้การมองเห็นคลื่นแสงเป็นสีต่าง ๆ ตั้งแต่สีม่วงไปจนถึงสีแดงได้ โดยถ้าพิจารณาสเปกตรัมของแสงในช่วงที่ตามองเห็น ซึ่งเป็นแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร ตามนุษย์จะมองเห็นสี ดังรูป

รูป 11.45 สเปกตรัมของแสงในช่วงที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร)

การบอกว่าเซลล์รูปกรวยชนิดใดทำให้เห็นสีใดนั้น อาจไม่เหมาะสมและทำให้เกิดความสับสนได้ เช่น การเรียกเซลล์รูปกรวยชนิด L ว่า เซลล์รูปกรวยสีแดง จากการที่แสงสีแดงซึ่งมีความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร ทำให้เฉพาะเซลล์รูปกรวยชนิด L ตอบสนองเท่านั้น การเรียกดังกล่าว อาจจะทำให้เข้าใจที่คลาดเคลื่อนได้ว่าเซลล์รูปกรวยชนิดนี้ตอบสนองเฉพาะเมื่อมีแสงสีแดงมาตกกระทบเท่านั้น ทั้งที่ความจริงแล้วช่วงความยาวคลื่นของแสงที่เซลล์รูปกรวยนี้ตอบสนองนั้นค่อนข้างกว้าง ตั้งแต่ 500-700 นาโนเมตร และครอบคลุมแสงหลายสี

11.4.2 การผสมแสงสี

แสงที่สะท้อนหรือทะลุผ่านวัตถุต่าง ๆ มักไม่เป็นแสงเพียงสีเดียว การเห็นสีของแสงอาจเกิดจากการผสมแสงสีต่าง ๆ ซึ่งการผสมแสงสีมีผลอย่างไรต่อการมองเห็นอย่างไรนั้น ศึกษาได้จากกิจกรรม 11.4

กิจกรรม 11.4 การผสมแสงสีบนฉากขาว

จุดประสงค์

สังเกตการผสมแสงสี

วัสดุและอุปกรณ์

1. กล่องผสมแสงสี 1 กล่อง

รูป กล่องผสมแสงสี

วิธีทำกิจกรรม

1. ถือกล่องผสมแสงสีโดยหันด้านที่มีแผ่นกรองแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน รับแสงจากดวงอาทิตย์
2. หมุนแผ่นกรองแสงสีและตัวสะท้อนให้แสงที่ผ่านแผ่นกรองแสงสีทั้งสามตกกระทบที่ตำแหน่งเดียวกันบนฉากของกล่องผสมแสงสี
3. สังเกตการผสมของแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน แล้วบันทึกผล
4. ทำการทดลองซ้ำโดยปรับแผ่นกรองแสงสีทั้งสามเพื่อให้แสงที่ผ่านแผ่นกรองแสงสีเกิดเป็นวงสีซ้อนกันตามลำดับ ดังนี้ ก. แดงและเขียว ข. แดงและน้ำเงิน ค. เขียวและน้ำเงิน สังเกตแสงสีผสมที่ปรากฏบนฉากในแต่ละครั้ง แล้วบันทึกผล

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ สีที่ปรากฏบนฉาก ณ บริเวณที่วงสีซ้อนกัน เหมือนกับสีของแสงที่มาซ้อนสีใดสีหนึ่งหรือไม่

จากกิจกรรม 11.4 พบว่า เมื่อนำแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน มาผสมกันบนฉากขาวด้วยสัดส่วนที่เท่า ๆ กัน จะให้ผลเหมือนกับเราฉายแสงขาวบนฉาก นั่นคือ เมื่อนำแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีน้ำเงิน มาผสมกันจะทำให้เรามองเห็นเป็นแสงสีขาว การทำงานของเซลล์รูปกรวยเพียงสามชนิดแต่สามารถเห็นสีได้มากกว่าสามสีนี่เองที่ใช้เป็นหลักการทำงานของจอโทรทัศน์หรืออุปกรณ์ที่แสดงผลเป็นสีต่าง ๆ โดยอุปกรณ์เหล่านี้ไม่จำเป็นต้องถูกออกแบบให้ผลิตแสงสีในทุกความยาวคลื่น แต่จะเน้นการทำงานโดยผลิตแสงที่จะไปกระตุ้นเซลล์รูปกรวยทั้งสามชนิดในระดับที่ต่าง ๆ กัน ตัวอย่างอุปกรณ์ที่น่าสนใจคือไดโอดเปล่งแสงชนิดสามสี (Tri-color LED) ซึ่งประกอบด้วย LED สามตัวที่ให้แสงสีน้ำเงิน สีเขียว และ

สีแดง อยู่ด้วยกัน ดังรูป 11.46 ก. โดย LED แต่ละตัวจะให้แสงที่ทำให้เซลล์รูปกรวยเพียงหนึ่งชนิดทำงานได้ดีที่สุดแต่เซลล์รูปกรวยอีกสองชนิดที่เหลือมีการทำงานที่น้อยมาก จนเราสามารถที่จะอธิบายอย่างง่ายว่า

LED สีน้ำเงิน จะกระตุ้นเฉพาะเซลล์รูปกรวยชนิด S

LED สีเขียว จะกระตุ้นเฉพาะเซลล์รูปกรวยชนิด M

LED สีแดง จะกระตุ้นเฉพาะเซลล์รูปกรวยชนิด L

ก. ไดโอดเปล่งแสงชนิดสามสี

ข. ภาพขยายจอภาพ LED

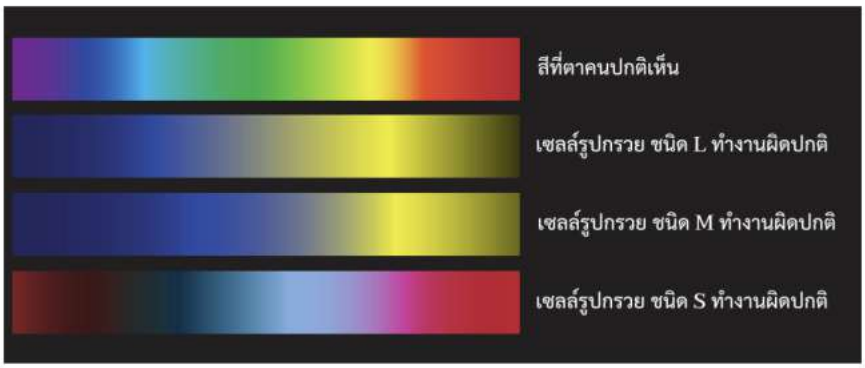
รูป 11.46 ตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างภาพ

ไดโอดเปล่งแสงชนิดสามสีเป็นอุปกรณ์หลักของโทรทัศน์ระบบ LED ที่ใช้ในปัจจุบัน มีหลักการสร้างภาพที่ทำให้ตาของมนุษย์เห็นแสงสีต่าง ๆ ได้โดยใช้เพียงแหล่งกำเนิดแสงสีน้ำเงิน เขียว และแดงที่มีขนาดเล็กมาก ๆ และอยู่ใกล้กันมาก ๆ จนตาของมนุษย์ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ ดังรูป 11.46 ข. ตัวอย่าง เช่น ถ้า LED ส่วนที่เป็นสีแดงและสีเขียวทำงาน ก็จะทำให้เซลล์รูปกรวย L และ M ตอบสนองเท่า ๆ กัน ทำให้เราเห็นเป็นสีเหลืองได้ทั้ง ๆ ที่อุปกรณ์ชนิดนี้ไม่เคยส่งแสงความยาวคลื่นสีเหลืองออกมาเลย และถ้าปรับความเข้มของแสงที่ออกจาก LED สีแดงเพิ่มขึ้นก็จะทำให้เซลล์รูปกรวยชนิด L ตอบสนองมากกว่าเซลล์รูปกรวยชนิด M จึงทำให้เรามองเห็นเป็นสีแสด ในทำนองเดียวกัน การทำงานของ LED ส่วนที่เป็นสีน้ำเงิน ร่วมกับ LED สีเขียว ก็จะทำให้เราเห็นเป็นสีน้ำเงินเขียวได้ ดังนั้น ไดโอดเปล่งแสงชนิดสามสีเพียงหนึ่งอันจึงสามารถทำให้ตาเรามองเห็นเป็นสีต่าง ๆ ได้ครบทุกสีเพียงแค่การปรับความเข้มแสงของ LED ทั้ง 3 สี

แสงทั้ง 3 สี คือ สีแดง เขียว และ น้ำเงิน จัดว่าเป็น **แสงสีปฐมภูมิ** (primary colours of light) เพราะสามารถทำให้เซลล์รูปกรวยตอบสนองในรูปแบบต่าง ๆ กันและสามารถผสมกันให้เราเห็นเป็นสีต่าง ๆ ได้ ดังรูป 11.47

รูป 11.47 การผสมแสงสี

สำหรับคนที่มีเซลล์รูปกรวยบางชนิดทำงานบกพร่องจะทำให้การมองเห็นสีมีความผิดเพี้ยนไปจากคนปกติ เราเรียกความผิดปกตินี้ว่า **การบอดสี** (colour blindness) โดยตัวอย่างการมองเห็นสีที่ต่างไปเนื่องจากความผิดปกติของเซลล์รูปกรวยแสดงดังรูป 11.48 ซึ่งจะเห็นได้ว่า คนที่เซลล์รูปกรวยชนิด L ทำงานผิดปกติ หรือ เซลล์รูปกรวยชนิด M ทำงานผิดปกติ จะยังเห็นแสงความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร เป็นสีเหลือง และแสงความยาวคลื่น 470 นาโนเมตร เป็นสีน้ำเงินเหมือนคนปกติ แต่จะไม่สามารถบอกความแตกต่างระหว่างแสงที่มีช่วงความยาวคลื่น 530 – 700 นาโนเมตร ได้ กล่าวคือ ไม่สามารถแยกแสงสีแดง แสงสีเขียว และแสงสีเหลืองได้ แต่สำหรับคนที่เซลล์รูปกรวยชนิด S ทำงานผิดปกติ จะมองเห็นสีที่แตกต่างกันไปจากคนปกติ แต่ก็ยังสามารถบอกได้ว่า แสงที่มีความยาวคลื่น 530 นาโนเมตร (แสงสีเขียวของคนปกติ) ต่างจาก แสงที่มีความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร (แสงสีแดงของคนปกติ)



รูป 11.48 จำลองการมองเห็นสีของคนตาบอดสีเปรียบเทียบกับคนปกติ

รู้หรือไม่

การทดสอบการมองเห็นสี (colour vision test) มีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้เนื่องจากทดสอบง่ายและใช้เวลาน้อย คือ การทดสอบอิชิฮารา (Ishihara test) เป็นการตรวจคร่าว ๆ โดยอาศัยการแยกสีเขียวและสีแดง อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยแผ่นภาพจำนวน 24 แผ่น แต่ละแผ่นประกอบด้วยวงกลมเล็ก ๆ จำนวนมากที่มีสีและขนาดต่างกันอยู่คละกัน ภายในวงกลมที่คละสีดังกล่าวจะมีการจัดเรียงเป็นตัวเลขหรือเส้นขดไปมา ซึ่งคนที่ตาปกติมองดูแล้วจะอ่านได้ถูกต้อง แต่คนที่ตาบอดสีแดงหรือสีเขียวจะไม่สามารถอ่านได้อย่างถูกต้อง ดังตัวอย่างแผ่นภาพในรูป คนที่ตาปกติจะเห็นเป็นเลข 42 ส่วนคนที่ตาบอดสีแดงและสีเขียวจะเห็นเป็นเลข 2 และ 4 ตามลำดับ

รูป ตัวอย่างแผ่นทดสอบการมองเห็นสี

11.4.3 แผ่นกรองแสงและสีของวัตถุ

เมื่อให้แสงขาวตกกระทบวัตถุต่าง ๆ เราจะเห็นวัตถุมีสีแตกต่างกัน การมองเห็นสีของวัตถุขึ้นกับปัจจัยอะไรบ้าง แสงสีมีอิทธิพลต่อการมองเห็นสีของวัตถุอย่างไร เราจะเริ่มจากการศึกษาแสงสีที่ผ่านแผ่นกรองแสงสีในกิจกรรม 11.5

กิจกรรม 11.5 แผ่นกรองแสงสี

จุดประสงค์

อธิบายสมบัติของแผ่นกรองแสงสีต่าง

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดกล่องแสง 1 ชุด
2. หม้อแปลงโวลต์ต่ำ 12 โวลต์ 1 เครื่อง
3. ปริซึมสามเหลี่ยม 1 อัน
4. แผ่นพลาสติกใสสีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง อย่างละ 1 แผ่น

รูป การศึกษาสมบัติของแผ่นกรองแสงสีต่าง ๆ

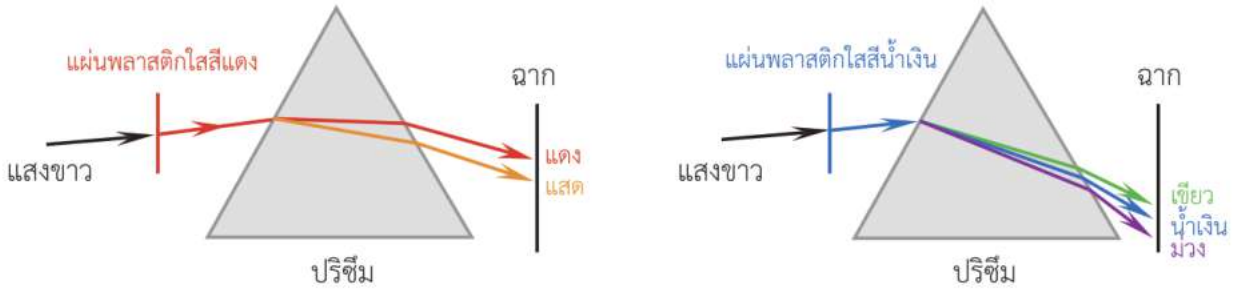
วิธีทำกิจกรรม

1. ต่อหลอดไฟฟ้าของกล่องแสงเข้ากับหม้อแปลงโวลต์ต่ำ 12 โวลต์
2. นำแผ่นช่องแสงที่มีช่องเปิด 1 ช่อง มาปิดหน้ากล่องแสง
3. วางปริซึมสามเหลี่ยมโดยให้ลำแสงตกกระทบปริซึมเพื่อเกิดการกระจายแสงบนกระดาษขาว ดังรูป
4. ปรับมุมที่ลำแสงตกกระทบปริซึมเพื่อให้เกิดการกระจายแสงชัดที่สุด บันทึกแถบสีที่เกิดขึ้น
5. นำแผ่นพลาสติกใสสีม่วง สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง มาวางกั้นหน้าแผ่นช่องแสงทีละแผ่น สังเกตและบันทึกแถบสีที่เกิดขึ้นจากการกระจายแสง

คำถามท้ายกิจกรรม

☐ เมื่อกั้นแสงหน้าช่องแสงด้วยแผ่นพลาสติกใสแต่ละสี แถบสีที่เกิดขึ้นจากการกระจายแสงเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร

เมื่อให้แสงขาวซึ่งประกอบด้วยแสงหลายสีตกกระทบแผ่นพลาสติกใสซึ่งจะเป็นสีใดก็ตาม จะเห็นแสงสีที่เคลื่อนที่ผ่านเป็นสีตามแผ่นพลาสติกนั้น แต่ถ้าใช้ปริซึมสามเหลี่ยมกระจายแสงที่ผ่านแผ่นพลาสติกใสสีต่าง ๆ จะพบว่ามีแสงสีบางสีทะลุผ่านได้ แต่แสงบางสีจะถูกดูดกลืนไว้ เช่น เมื่อใช้แผ่นพลาสติกใสสีแดงจะเห็นแถบสีจากการกระจายแสงเป็นแสงสีแดง ซึ่งอาจมีสีแสดปน ดังรูป 11.49 ก. ส่วนแสงสีม่วง สีน้ำเงิน และสีเขียวจะถูกดูดกลืน เราจึงเห็นแสงที่ผ่านแผ่นพลาสติกใสมีสีแดง ในทำนองเดียวกัน เมื่อใช้แผ่นพลาสติกใสสีน้ำเงินก็จะเห็นแถบสีจากการกระจายแสงเป็นแสงสีน้ำเงิน และอาจมีแสงสีเขียวและแสงสีม่วงปนออกมาด้วย ดังรูป 11.49 ข.

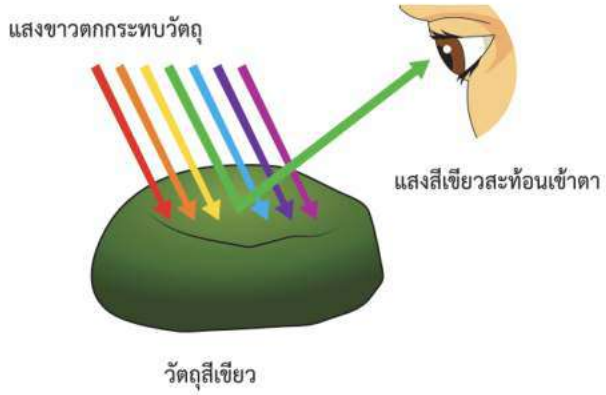


ก. แผ่นพลาสติกใสสีแดง **ข. แผ่นพลาสติกใสสีน้ำเงิน**

รูป 11.49 แสงสีที่ผ่านแผ่นพลาสติกใสสีแดงและสีน้ำเงิน

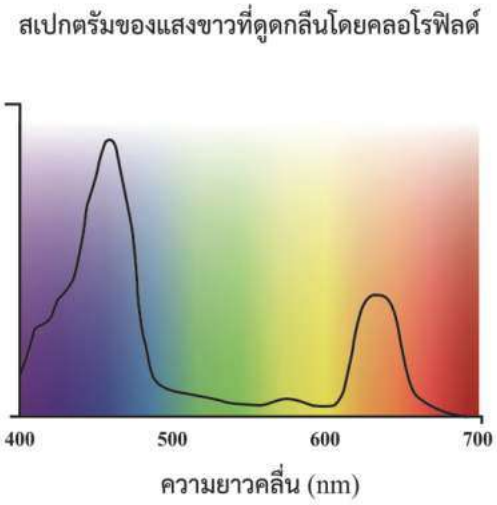
เมื่อจะอธิบายในเชิงความยาวคลื่น อาจจะกล่าวได้ว่า แสงขาวที่มีความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร นั้น เมื่อผ่านแผ่นพลาสติกใสสีน้ำเงินจะดูดกลืนแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ไว้ เหลือเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 470 นาโนเมตร ซึ่งแสงความยาวคลื่นนี้จะมีสีน้ำเงิน ในขณะที่แผ่นพลาสติกใสสีแดง จะดูดกลืนแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ไว้ เหลือเฉพาะแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 700 นาโนเมตร ซึ่งแสงความยาวคลื่นนี้จะมีสีแดง เราเรียก วัสดุที่ใสซึ่งกั้นแสงสีบางสีไว้ และยอมให้แสงสีบางแสงสีผ่านไปได้ เรียกว่า **แผ่นกรองแสงสี** (colour filter)

การมองเห็นสีของวัตถุ ก็อธิบายได้ในทำนองเดียวกัน นั่นคือ ในกรณีที่แสงขาวตกกระทบวัตถุทึบแสงซึ่งมีสารที่ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงแต่ละสีที่ประกอบเป็นแสงขาวนั้นไว้ในปริมาณต่าง ๆ กัน และยังทำหน้าที่สะท้อนแสงส่วนที่เหลือจากการดูดกลืนกลับเข้าตา ทำให้เราเห็นวัตถุเป็นสีเดียวกับแสงที่สะท้อนมาเข้าตามากที่สุด สารในวัตถุที่ทำหน้าที่ดังกล่าวเรียกว่า **สารสี** (pigment) โดยวัตถุที่มีสีต่างกันจะมีสารสีต่างกัน เช่น ถ้าหากวัตถุชนิดหนึ่งมีสารสีที่ดูดกลืนแสงทุกความยาวคลื่น ยกเว้นแสงที่มีความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร แต่แทนที่จะปล่อยแสงความยาวคลื่นนี้ให้ทะลุออกไปเหมือนกรณีของแผ่นกรองแสง สารสีในวัตถุนี้ได้สะท้อนแสงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ออกมา ดังนั้นถ้าเราฉายแสงขาวซึ่งมีแสงที่ตามองเห็นในทุกความยาวคลื่นลงไปที่วัตถุนี้ ก็จะมีเฉพาะแสงความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร สะท้อนออกมาเข้าตาเรา ทำให้เรามองเห็นวัตถุนี้เป็นสีเขียว ดังรูป 11.50

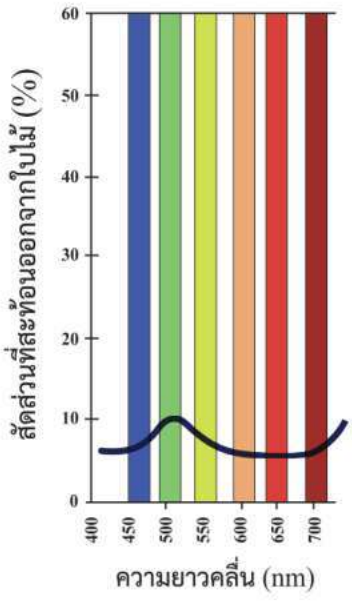


รูป 11.50 วัตถุที่ดูดกลืนแสงสีต่าง ๆ และสะท้อนเฉพาะสีเขียวออกมา

แนวคิดเรื่องสีของวัตถุนี้สามารถใช้เป็นแนวทางที่อธิบายว่าทำไมมองเห็นใบไม้ทั่วไปมีสีเขียว เพราะใบไม้มีคลอโรฟิลด์เป็นองค์ประกอบซึ่งสามารถดูดกลืนแสงสีต่าง ๆ ดังรูป 11.51 ก. จะเห็นว่าคลอโรฟิลล์มีการดูดกลืนได้ดีในช่วงแสงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร และช่วง 600-650 นาโนเมตร นั่นคือ แสงที่จะสะท้อนออกมาจากใบไม้จะมีความยาวคลื่นในช่วง 500-600 นาโนเมตร ดังรูปที่ 11.51 ข. ซึ่งมีทั้งสีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง และสีแสด โดยมีแสงสีเขียวที่สะท้อนออกมาในปริมาณมากที่สุด เมื่อแสงสีเหล่านี้เข้ามาถึงตาของมนุษย์เรา เราจะบอกโดยภาพรวมว่าเป็น สีเขียว ซึ่งคือสีของใบไม้ที่เราเห็น



ก. การดูดกลืนแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ของคลอโรฟิลด์



ข. สเปกตรัมของแสงที่สะท้อนออกจากใบไม้

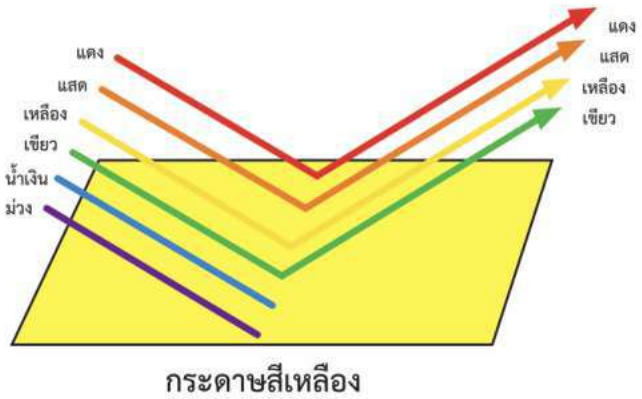
รูปที่ 11.51 การดูดกลืนและการสะท้อนของใบไม้

11.4.4 การผสมสารสี

ความรู้เกี่ยวกับสารสีและการดูดกลืนแสงในบางความยาวคลื่นและสะท้อนแสงส่วนที่เหลือออกมา นอกจากจะใช้อธิบายสีของวัตถุแล้ว ยังสามารถใช้อธิบายการผสมสารสี เช่น การผสมสีโปสเตอร์ การผสมสีของหมึกพิมพ์ หรือ สีทาผนังได้ โดยสารสีที่ไม่อาจสร้างขึ้นจากการผสมสารสีต่าง ๆ เข้าด้วยกันมี 3 สี คือ สารสีน้ำเงินเขียว (Cyan) สารสีเหลือง (Yellow) และสารสีแดงม่วง (Magenta) ซึ่งเรียกว่า **สารสีปฐมภูมิ** (primary colours of pigment) ซึ่งหมายความว่า สารสีเหล่านี้เมื่อผสมกันแล้วจะได้สีต่าง ๆ ครบทุกสี จึงถูกนำมาใช้เป็นสีหลักในเครื่องพิมพ์ส่วนใหญ่ โดยอาจมีการใช้สารสีดำ (Black) ร่วมด้วยเพื่อเป็นการประหยัดสารสีอื่น ๆ ในงานที่ต้องการเพียงสีดำ ดังรูป 11.52

รูป 11.52 แม่สีของสารสีที่ใช้ในเครื่องพิมพ์สี ประกอบด้วย Cyan Yellow Magenta

การอธิบายการผสมสารสี สามารถพิจารณาได้จากแสงสีที่ถูกดูดกลืนและถูกสะท้อนออกจากสารสีแต่ละสี เช่น ฉายแสงขาวลงบนกระดาษที่มีสารสีเหลืองอยู่ สารสีเหลืองจะดูดกลืนแสงส่วนที่เป็นสีน้ำเงินของแสงขาว ซึ่งเป็นแสงส่วนที่จะกระตุ้นเซลล์รูปกรวยชนิด S ให้ทำงาน และจะสะท้อนแสงความยาวคลื่นอื่น ๆ ซึ่งแสงที่สะท้อนจากสารสีเหลืองจะกระตุ้นให้เซลล์รูปกรวยชนิด M และ L ทำงาน การที่เซลล์รูปกรวยสองชนิดนี้ทำงานพร้อม ๆ กัน ทำให้ตาของเราก็จะเห็นกระดาษเป็นสีเหลือง ดังรูป 11.53



รูป 11.53 แบบจำลองการดูดกลืนและการสะท้อนแสงสีของสารสีเหลือง

เราอาจอธิบายแบบง่าย ๆ ว่า แสงสีที่สะท้อนจากสารสีเหลืองที่เราเห็นนั้น คือ แสงสีเขียว (กระตุ้นเซลล์รูปกรวยชนิด M) และ แสงสีแดง (กระตุ้นเซลล์รูปกรวยชนิด L) ในขณะที่แสงสีที่ถูกดูดกลืนโดยสารสีเหลืองคือ แสงสีน้ำเงิน (กระตุ้นเซลล์รูปกรวยชนิด S) ในกรณีสารสีน้ำเงินเขียวและสารสีแดงม่วงก็ทำงานในทำนองเดียวกัน กล่าวคือ สารสีน้ำเงินเขียวก็จะดูดกลืนแสงสีแดงแต่สะท้อนแสงสีน้ำเงินและ

แสงสีเขียว ส่วนสารสีแดงม่วงก็จะดูดกลืนแสงสีเขียวแต่สะท้อนแสงสีแดงและแสงสีม่วง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตาราง 11.3

ตาราง 11.3 การดูดกลืนและการสะท้อนแสงสีปฐมภูมิโดยสารสีปฐมภูมิ

สารสีปฐมภูมิ	แสงสีปฐมภูมิที่ดูดกลืน	แสงสีปฐมภูมิที่สะท้อน
สารสีเหลือง	แสงสีน้ำเงิน	แสงสีแดง และ แสงสีเขียว
สารสีน้ำเงินเขียว	แสงสีแดง	แสงสีน้ำเงิน และ แสงสีเขียว
สารสีแดงม่วง	แสงสีเขียว	แสงสีน้ำเงิน และ แสงสีแดง

ถ้าเรานำสารสีเหลืองและสารสีแดงม่วงมาผสมกัน จะทำให้สารสีนี้ดูดกลืนแสงส่วนที่เป็นสีน้ำเงิน และส่วนที่เป็นสีเขียวของแสงขาว และแสงที่สะท้อนออกมาจากสารสีนี้จะทำให้ เซลล์รูปกรวยชนิด L เท่านั้นทำงาน จึงเห็นเป็นสีแดง ทำให้เราบอกว่า สารสีที่ผสมกันระหว่างสารสีเหลืองและสารสีแดงม่วงเป็นสีแดง ส่วนการผสมสีของสารสีในกรณีอื่น ๆ สามารถแสดงได้ดังรูป 11.54

รูป 11.54 การผสมสารสี

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 11.4

1. หากฉายแสงขาวไปตกกระทบวัตถุที่มีสีดำ แสงสีใดบ้างที่จะถูกดูดกลืนโดยสารสีของวัตถุนั้น และแสงสีใดบ้างจะสะท้อนโดยสารสีของวัตถุนั้นกลับเข้าสู่ตาผู้สังเกต
2. จงอธิบายสีที่เกิดจากการผสมสารสีน้ำเงินเขียวและสารสีแดงม่วง โดยอาศัยความรู้เรื่องการดูดกลืนและการสะท้อนแสงสีของสารสี
3. เหตุใด หมึกของเครื่องพิมพ์เอกสารส่วนใหญ่จึงมีเพียงแค่ 4 สี คือ สีน้ำเงินเขียว (Cyan) สีเหลือง (Yellow) สีแดงม่วง (Magenta) และสีดำ (Black)
4. เมื่อฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสงสีน้ำเงินไปบนวัตถุสีแดง เรามองเห็นเป็นสีอะไร เพราะเหตุใด
5. การผสมแสงสีในรูป 11.47 และการผสมสารสีในรูป 11.54 มีความเชื่อมโยงกันอย่างไร

11.5 การอธิบายปรากฏการณ์ธรรมชาติและการใช้ประโยชน์เกี่ยวกับแสง

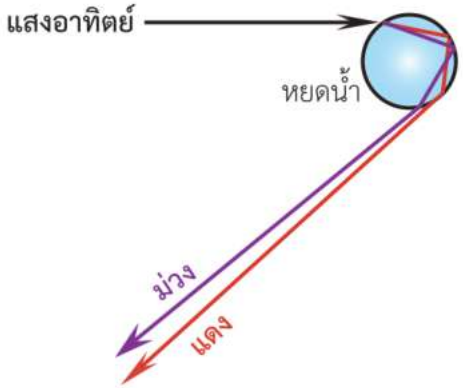
ความรู้เรื่องแสงเชิงรังสีสามารถนำไปใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในธรรมชาติ เช่น การเกิดรุ้ง การทรงกลด การเกิดมิราจ การเห็นท้องฟ้าเป็นสีต่าง ๆ รวมทั้ง การนำความรู้เรื่องกระจกและเลนส์บางไปประยุกต์ใช้ได้อย่างไร จะศึกษาได้จากหัวข้อนี้

11.5.1 ปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เกี่ยวกับแสง

การเกิดรุ้ง

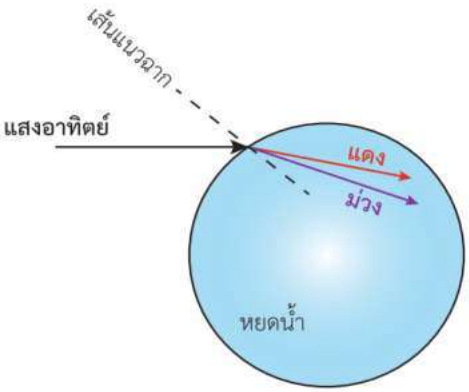
รุ้ง (rainbow) เป็นปรากฏการณ์ที่มักพบเห็นได้ในช่วงก่อนหรือหลังฝนตกเล็กน้อย เกิดจากการที่แสงอาทิตย์หักเหผ่านละอองน้ำหรือหยดน้ำ โดยหยดน้ำในอากาศทำหน้าที่คล้ายปริซึมในการกระจายแสงออกเป็นสเปกตรัมของแสงขาว หากพิจารณาลักษณะของการสะท้อนของแสงเมื่อตกกระทบหยดน้ำในอากาศก่อนเกิดการกระจายแสง จะสามารถแยกรุ้งได้เป็น 2 ชนิด คือ **รุ้งปฐมภูมิ** (primary rainbow) และ **รุ้งทุติยภูมิ** (secondary rainbow)

รุ้งปฐมภูมิเกิดจากแสงขาวจากอาทิตย์หักเหเข้าสู่หยดน้ำ จากนั้นเกิดการสะท้อนจากผิวด้านในของหยดน้ำ แล้วจึงเกิดการหักเหอีกครั้งหนึ่งตอนออกจากหยดน้ำ และเข้าตาเราด้วยมุมที่แตกต่างกันให้เห็นเป็นรุ้ง ดังรูป 11.55



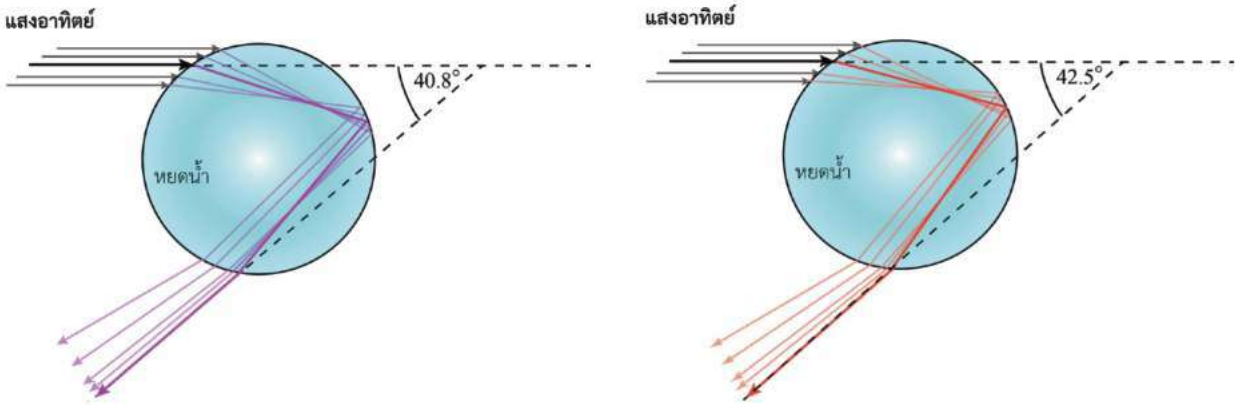
รูป 11.55 การเกิดรุ้งปฐมภูมิ

หากพิจารณาการหักเหครั้งแรกตรงจุดที่แสงอาทิตย์เข้าสู่หยดน้ำโดยใช้แสงสีแดงและม่วงเป็นตัวแทนของแสงขาว จะพบว่า แสงสีม่วงจะเกิดการเบนจากแนวเดิมมากที่สุด ในขณะที่แสงสีแดงจะเบนจากแนวเดิมน้อยที่สุด เนื่องจากสมบัติการกระจายแสงของน้ำที่มีดรรชนีหักเหสำหรับแสงสีต่าง ๆ ไม่เท่ากัน โดยที่ดรรชนีหักเหของน้ำสำหรับแสงสีม่วงมีค่ามากกว่าแสงสีแดงจึงทำให้แสงสีม่วงเกิดการเบนจากแนวเดิมที่มากกว่าแสงสีแดง นั่นคือ เมื่อแสงทั้งสองสีนี้ตกกระทบหยดน้ำครั้งแรกด้วยมุมตกกระทบเดียวกัน จะมีมุมหักเหไม่เท่ากัน ดังรูป 11.56



รูป 11.56 การหักเหครั้งแรกที่ผิวของหยดน้ำ

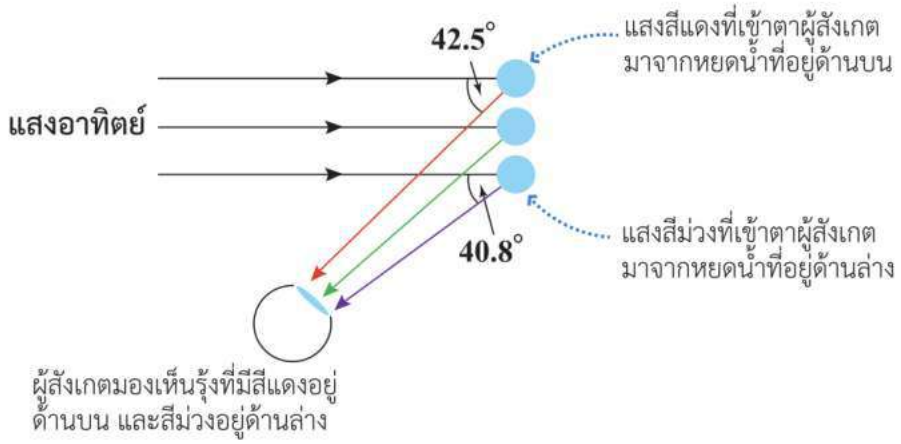
ปัญหาที่น่าสนใจในการอธิบายการเกิดรุ้ง คือ มุมที่แสงสีหักเหออกสู่อากาศจะเป็นอย่างไร เมื่อตำแหน่งที่แสงอาทิตย์ตกกระทบหยดน้ำเปลี่ยนไป ซึ่งเราจะเข้าใจเรื่องนี้ได้ดีขึ้นถ้าพิจารณาการตกกระทบหยดน้ำของแสงสีม่วงเท่านั้น ดังรูป 11.57 ก. ซึ่งแสดงรังสีของแสงสีม่วงจำนวน 5 เส้น ที่ตกกระทบหยดน้ำที่ตำแหน่งต่าง ๆ จะพบว่า รังสีแต่ละเส้นเกิดการหักเหและสะท้อนในหยดน้ำ จากนั้นเกิดการหักเหออกมาสู่อากาศ โดยมีแนวหนึ่งที่มีรังสีหลายๆ เส้นออกมาใกล้เคียงกัน คือแนวที่ทำมุม 40.8 องศา ซึ่งเป็นมุมที่แสงสีม่วงมีความเข้มสูงที่สุด สำหรับแสงสีอื่นก็จะมีมุมที่มีความเข้มสูงที่สุดแตกต่างกันไป โดยแสงสีแดงจะมีความเข้มสูงที่สุดที่มุมประมาณ 42.5 องศา ดังรูป 11.57 ข. การอธิบายการเกิดรุ้งปฐมภูมิด้วยรูป 11.55 จึงเป็นรูปอย่างง่าย ที่แสดงเฉพาะรังสีในมุมที่แสงมีความเข้มมากที่สุด



ก. การเคลื่อนที่ของแสงสีม่วงในหยดน้ำ **ข. การเคลื่อนที่ของแสงสีแดงในหยดน้ำ**

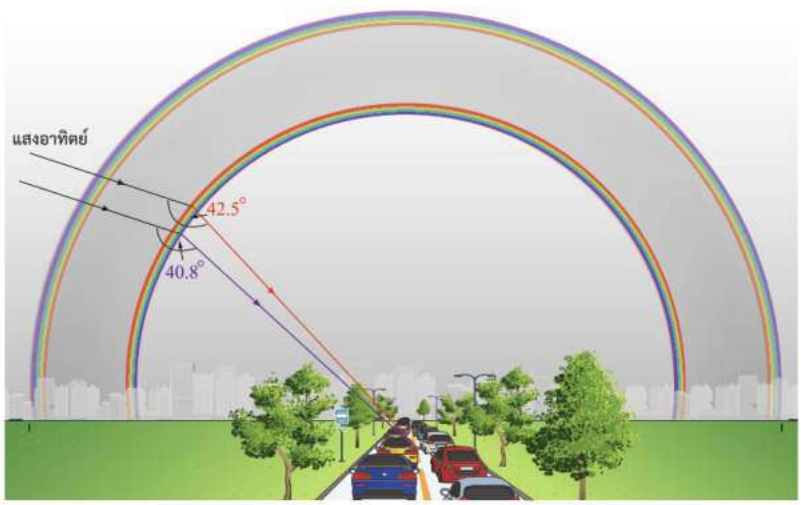
รูป 11.57 การเคลื่อนที่ของแสงสีม่วงและแสงสีแดงในหยดน้ำ

เมื่อแสงดังกล่าวตกกระทบหยดน้ำในตำแหน่งต่าง ๆ กัน ตามปกติแสงที่หักเหออกจากหยดน้ำหยดหนึ่ง ๆ จะมีสเปกตรัมของแสงครบทุกสี แต่เนื่องจากสายตาของผู้สังเกตจะทำมุมใดมุมหนึ่งกับหยดน้ำหยดนั้น ๆ จึงทำให้สามารถเห็นได้เพียงแสงสีใดสีหนึ่งตามมุมที่เหมาะสมเท่านั้น ดังนั้น การจะเห็นแสงสีต่าง ๆ จากหยดน้ำให้เกิดเป็นรุ้งได้นั้น แสงแต่ละสีที่เข้าตาจะต้องมาจากหยดน้ำคนละหยด โดยในการเกิดรุ้งปฐมภูมิ แสงสีแดงที่มาเข้าตาจะต้องมาจากหยดน้ำอีกหยดหนึ่งที่อยู่ด้านบนหยดน้ำที่ทำให้เกิดแสงสีม่วง ดังรูป 11.58



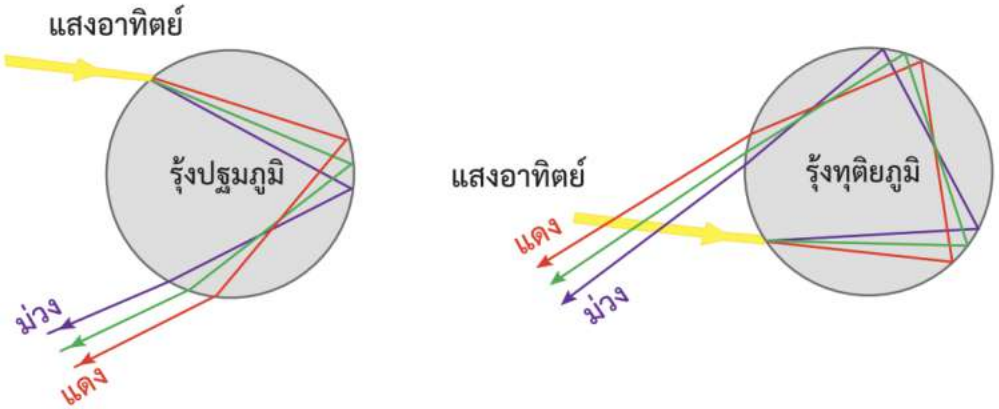
รูป 11.58 การเห็นรุ้งสีม่วงและสีแดงที่มาจากหยดน้ำคนละหยด

การที่เราเข้าใจว่าหยดน้ำที่จะทำให้เราเห็นแสงสีแต่ละแสงสีจะต้องมีมุมที่เหมาะสม เช่น แสงสีม่วงจะต้องเป็นหยดน้ำที่ทำให้มุมระหว่างรังสีจากดวงอาทิตย์และรังสีที่มาเข้าตาเรานั้นทำมุมกันประมาณ 40.8° และแสงสีแดงจะต้องเป็นหยดน้ำที่ทำให้มุมระหว่างรังสีจากดวงอาทิตย์และรังสีที่มาเข้าตาเรานั้นทำมุมกันประมาณ 42.5° ทำให้เราสามารถอธิบายได้ว่า รุ้งที่มองเห็นนั้นเป็นส่วนของวงกลม เพื่อจะทำให้มุมของรังสีทั้งสองยังคงเป็น 40.8° สำหรับรุ้งสีม่วง และ 42.5° สำหรับรุ้งสีแดง ดังรูป 11.59



รูป 11.59 การเห็นรุ้งเป็นเส้นโค้ง

นอกจากนี้ แสงยังสามารถสะท้อนภายในหยดน้ำได้มากกว่าหนึ่งครั้ง ดังรูป 11.60 ข. ซึ่งจะทำให้ลำดับของแสงที่ออกมาและมุมที่แสงแต่ละสีมีความเข้มมากที่สุดนั้นต่างไปจากเดิม โดยรุ้งที่เกิดจากสะท้อนสองครั้งภายในหยดน้ำจะเรียกว่า รุ้งทุติยภูมิ แต่รุ้งชนิดนี้จะมีความเข้มของแสงต่ำกว่าชนิดที่มีการสะท้อนครั้งเดียวที่เรียกว่า รุ้งปฐมภูมิ

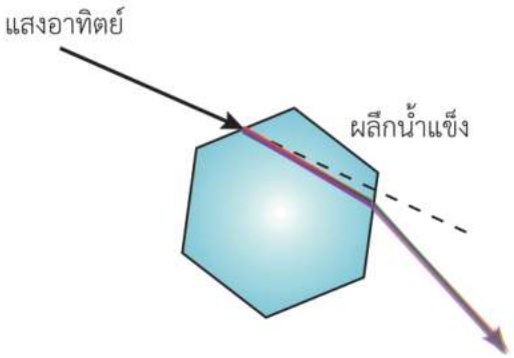


ก. การสะท้อนภายในหยดน้ำของรุ้งปฐมภูมิ ข. การสะท้อนภายในหยดน้ำของรุ้งทุติยภูมิ

รูป 11.60 การเปรียบเทียบการสะท้อนภายในหยดน้ำของรุ้งปฐมภูมิและรุ้งทุติยภูมิ

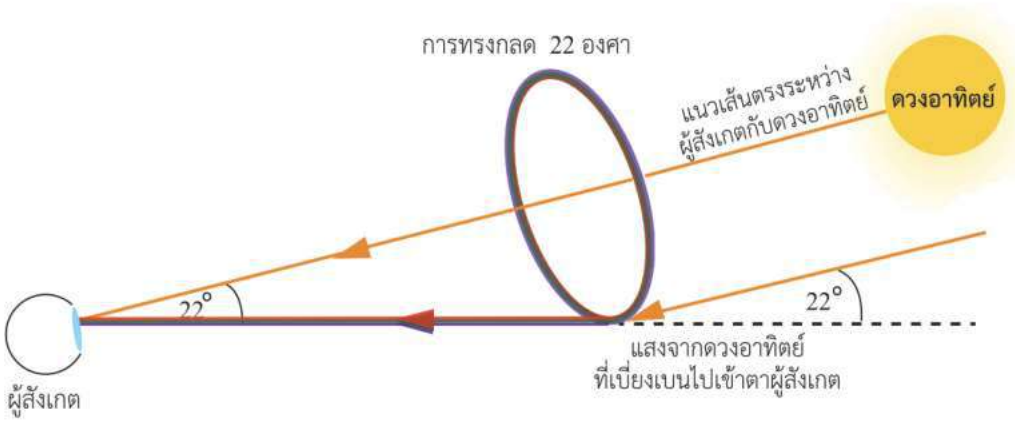
การทรงกลด

การทรงกลด (halo) เป็นปรากฏการณ์บนท้องฟ้าที่เกิดแถบของแสงสีเป็นวงรอบดวงอาทิตย์หรือดวงจันทร์ เกิดขึ้นจากเมฆที่ประกอบด้วยผลึกน้ำแข็งรูปหกเหลี่ยมในชั้นบรรยากาศสูง ๆ ที่มีอุณหภูมิต่ำ ที่สามารถเบี่ยงเบนเส้นทางเดินของแสงได้ ดังรูป 11.61



รูป 11.61 การหักเหของแสงผ่านผลึกน้ำแข็ง

การหักเหที่เกิดขึ้นจากผลึกน้ำแข็งในชั้นบรรยากาศ ทำให้รังสีของแสงที่มาจากดวงอาทิตย์เบี่ยงเบนไปจากแนวทางเดิมและเข้าตาของผู้สังเกตบนพื้นดินโดยมีมุม 22 องศากับแนวเส้นตรงระหว่างผู้สังเกตกับดวงอาทิตย์ เมื่อผู้สังเกตย้อนเส้นทางเดินของแสงเป็นเส้นตรง จะทำให้เห็นแสงว่ามาจากอีกที่หนึ่งที่ทำมุม 22 องศากับแนวตรงของดวงอาทิตย์ ดังรูป 11.62



รูป 11.62 แสงที่หักเหจากผลึกน้ำแข็งจะเข้าตาผู้สังเกตทำมุม 22 องศา กับแนวเส้นตรงของรังสีแสงจากดวงอาทิตย์

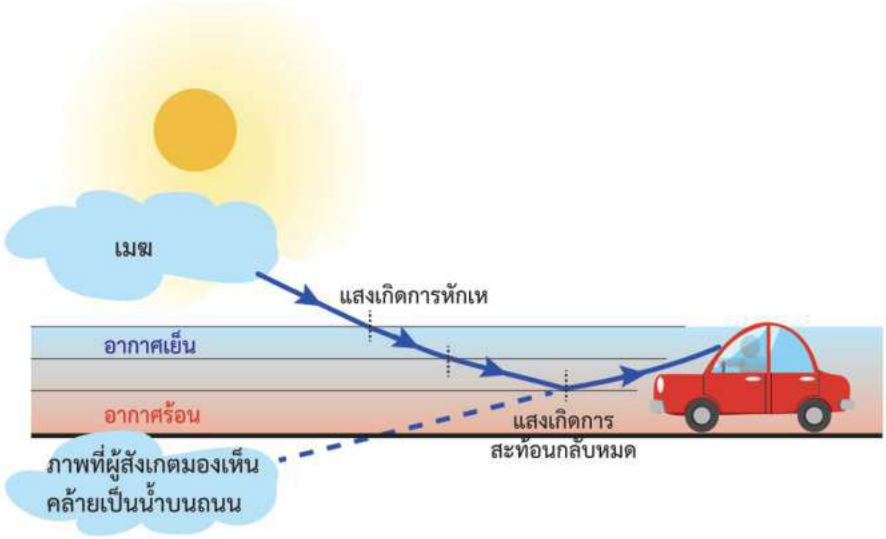
การหักเหของแสงนี้สามารถเกิดขึ้นได้โดยทำมุม 22 องศา รอบแนวเส้นตรงจากดวงอาทิตย์ เราจึงเห็นการทรงกลดที่เกิดขึ้นเป็นวงกลมรอบดวงอาทิตย์ ดังรูป 11.63

รูป 11.63 อาทิตย์ทรงกลด

การเกิดมิราจ

การที่เรามองเห็นภาพของน้ำอยู่บนพื้นถนน ทั้งที่ความจริงแล้วบริเวณนั้นเป็นถนนที่แห้ง ดังรูป 11.64 ก. เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ธรรมชาติที่เรียกว่า **มิราจ** (mirage) การเกิดมิราจเป็นปรากฏการณ์ทางแสงที่พบได้บ่อยภายใต้เงื่อนไขที่คล้าย ๆ กันคือ จะต้องเป็นบริเวณที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นกับอากาศมาก ๆ เช่น บนถนนหรือทะเลทรายซึ่งถูกแสงแดดความเข้มสูงในบริเวณดังกล่าว อากาศที่อยู่ใกล้พื้นจะมีอุณหภูมิสูงกว่าอากาศด้านบน ทำให้อากาศที่อยู่ใกล้พื้นมีความหนาแน่นน้อยและมีค่าดรรชนีหักเหน้อยกว่าอากาศที่อยู่ด้านบนที่เย็นกว่า แสงจากท้องฟ้า (ที่มีสีฟ้า) เกิดการหักเหที่รอยต่อระหว่างอากาศด้านบนและด้านล่างอย่างต่อเนื่องทำให้แสงที่เดินทางมายังพื้นเบนขึ้นที่ละน้อยจนเกิดการสะท้อนกลับหมดบริเวณใกล้พื้นและแสงจากท้องฟ้านี้เคลื่อนที่มาเข้าตาเรา ทำให้เราคิดว่าแสงสีฟ้านี้ออกมาจากส่วนที่เป็นถนนและดูคล้ายเป็นน้ำที่อยู่บนถนน ดังรูป 11.64 ข.

ก. มิราจที่ทำให้เห็นน้ำที่บนถนนแห้ง

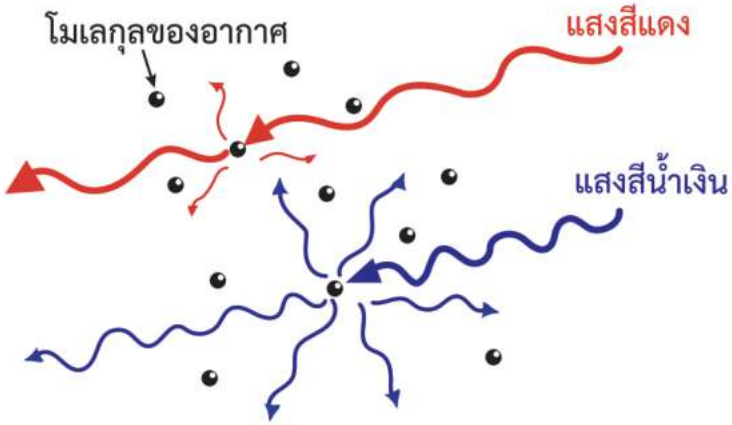


ข. การหักเหของรังสีของแสงในการเกิดมิราจ

รูป 11.64 การเกิดมิราจ

การเห็นท้องฟ้าเป็นสีต่าง ๆ ในช่วงเวลาต่างกัน

ถ้านักบินอวกาศที่อยู่บนดวงจันทร์หรืออยู่ในอวกาศมองไปยังดวงอาทิตย์โดยตรง เขาจะเห็นดวงอาทิตย์ที่สว่างจ้ามาก ในขณะที่ถ้าเขามองส่วนอื่น ๆ รอบดวงอาทิตย์ เขาจะเห็นเป็นสีดำ ซึ่งแตกต่างจากการมองดวงอาทิตย์ในเวลากลางวันบนโลก จะเห็นรอบ ๆ ดวงอาทิตย์เป็นสีฟ้าของท้องฟ้าไม่ได้เป็นสีดำเหมือนบนดวงจันทร์ ที่เป็นเช่นนี้ เพราะแสงอาทิตย์ที่ไปกระทบโมเลกุลของอากาศในชั้นบรรยากาศแล้วเกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า **การกระเจิง** (scattering) ของแสง ทำให้แสงกระเจิงออกมาในทุกทิศทางดังรูป



รูป 11.65 การกระเจิงของแสงเมื่อตกกระทบโมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศของโลก

สิ่งที่น่าสนใจคือ การที่แสงจะกระเจิงได้มากหรือน้อยนั้นขึ้นกับความยาวคลื่นของแสง โดยแสงสีม่วงซึ่งมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดกระเจิงได้ดีที่สุด ส่วนแสงสีน้ำเงินกระเจิงได้ดีรองจากแสงสีม่วง และแสงสีแดงจะกระเจิงได้น้อยที่สุด ดังนั้นเมื่อเรามองไปยังส่วนอื่นของท้องฟ้า ที่ไม่ใช่การมองดวงอาทิตย์โดยตรง เราจะเห็นแสงสีน้ำเงินและแสงสีม่วงที่กระเจิงออกมา แต่ประสาทตาของเราจะรับแสงสีน้ำเงินได้ดีกว่าแสงสีม่วง ทำให้เราเห็นท้องฟ้าเป็นสีฟ้า

การที่ดวงอาทิตย์ตอนเช้าหรือตอนเย็นจะเป็นสีแดงหรือแสดมากกว่าในเวลาอื่น ๆ ดังรูป 11.66 ก. เป็นเพราะว่าแสงที่มาเข้าตาเราจะต้องผ่านชั้นบรรยากาศในระยะทางที่ไกล ดังรูป 11.66 ข. ทำให้แสงสีต่าง ๆ กระเจิงไปเกือบหมด เหลือเพียงส่วนที่เป็นสีแดงที่มีการกระเจิงน้อยที่สุด จึงคล้ายกับว่าชั้นบรรยากาศนั้นทำหน้าที่เป็นแผ่นกรองแสงสีแดง ที่ยอมให้แสงสีแดงเท่านั้นมาเข้าตาเรา

ก. ดวงอาทิตย์ตอนเช้าหรือตอนเย็น

ข. ระยะทางที่แสงเดินทางผ่านชั้นบรรยากาศ

รูป 11.66 การกระเจิงของแสงอาทิตย์

11.5.2 การนำความรู้เรื่องกระจกเงาและเลนส์บางไปใช้ประโยชน์

<u>กล้องโทรทรรศน์</u>

กล้องโทรทรรศน์ (telescope) เป็นทัศนอุปกรณ์ที่ใช้ส่องวัตถุที่อยู่ไกล ประกอบด้วยเลนส์สองอัน อันหนึ่งอยู่ใกล้วัตถุเรียกว่า **เลนส์ใกล้วัตถุ** (objective lens) อีกอันหนึ่งอยู่ใกล้ตาเรียกว่า **เลนส์ใกล้ตา** (eyepiece lens) หลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์เป็นอย่างไร สามารถศึกษาได้จากกิจกรรม 11.6

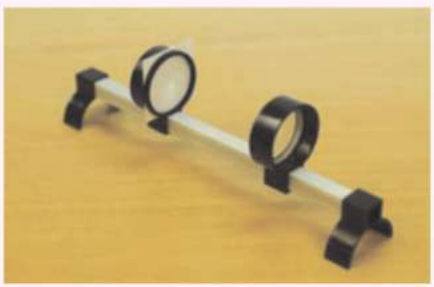
กิจกรรม 11.6 กล้องโทรทรรศน์

จุดประสงค์

อธิบายหลักการทำงานของกล้องโทรทรรศน์

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดกล้องโทรทรรศน์และจุลทรรศน์ 1 ชุด
2. ไม้เมตร 1 อัน



รูป การศึกษาการทำงานกล้องโทรทรรศน์

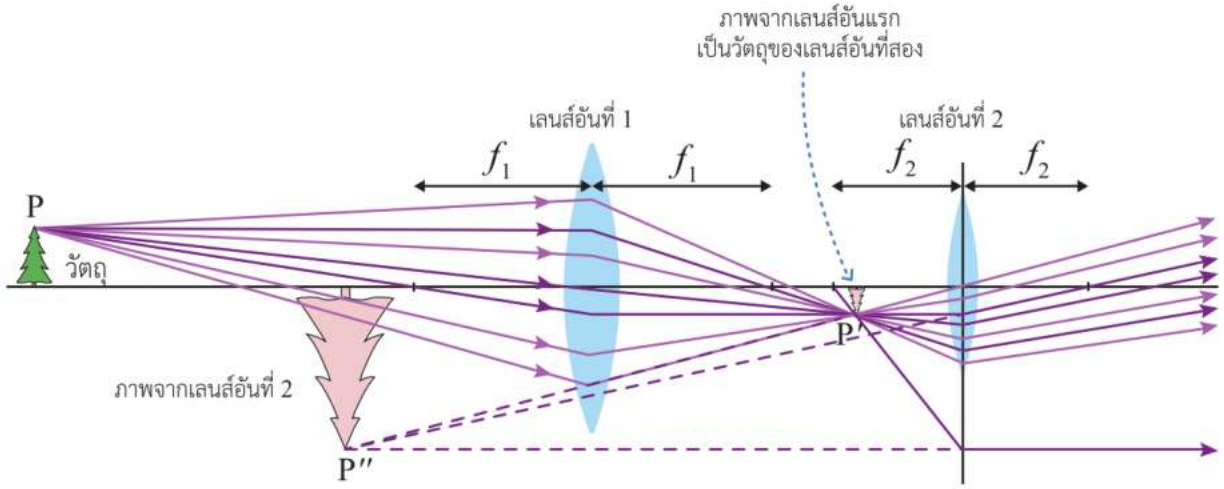
วิธีทำกิจกรรม

1. หาความยาวโฟกัสของเลนส์แต่ละอัน แล้ววางเลนส์บนรางเลื่อน ดังรูป
2. เลือกทิวทัศน์หรืออาคารบ้านเรือนที่อยู่ไกลออกไปเป็นวัตถุสำหรับทดลอง ทั้งนี้ อย่าใช้มองดวงอาทิตย์
3. จัดให้เลนส์ทั้งสองอยู่ห่างกันเท่ากับผลบวกของค่าความยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง โดยวางเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสน้อยอยู่ชิดปลายหนึ่งของรางเลื่อนและอยู่ใกล้ตา และให้เลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมากเป็นเลนส์ใกล้วัตถุ
4. มองภาพผ่านเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสน้อย ปรับตำแหน่งของเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมากไปมาอย่างช้า ๆ จนกระทั่งได้ภาพชัดที่สุด วัดระยะระหว่างเลนส์ และสังเกตภาพที่เกิดขึ้น

คำถามท้ายกิจกรรม

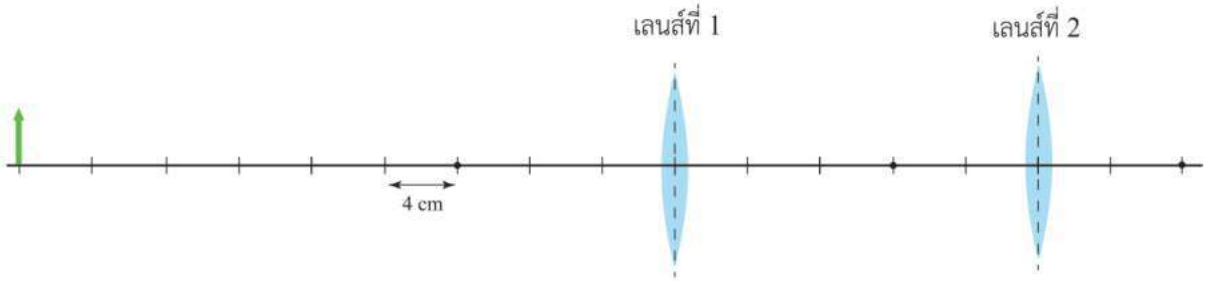
- ☐ ระยะระหว่างเลนส์ทั้งสองขณะเห็นภาพชัดที่สุดเป็นอย่างไร เมื่อเปรียบเทียบกับความยาวโฟกัสของเลนส์แต่ละอัน
- ☐ ภาพที่เห็นเหมือนหรือแตกต่างจากวัตถุหรือไม่ อย่างไร

แว่นขยายที่ทำจากเลนส์นูนเพียงหนึ่งอันจัดเป็นทัศนอุปกรณ์ที่ง่ายที่สุด แต่ถ้าต้องการที่จะเพิ่มกำลังขยายหรือเพิ่มความคมชัดของภาพ จะต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การใช้เลนส์นูนสองอันมาประกอบกัน ซึ่งการที่มีเลนส์มากกว่าหนึ่งอันก็จะมีหลักการที่เพิ่มเติมขึ้นจากเดิมคือ ภาพที่เกิดจากเลนส์อันแรกจะกลายเป็นวัตถุของเลนส์อันที่สอง ดังรูป 11.67 ถ้ามีวัตถุตั้งอยู่ที่จุด P ซึ่งภาพจากเลนส์อันแรก (อันซ้าย) จะเกิดที่ตำแหน่ง P′ และถูกใช้เป็นวัตถุสำหรับเลนส์อันที่สอง (อันขวา) ทำให้เกิดภาพเนื่องจากเลนส์อันที่สองที่จุด P″ โดยหลักการในการคิดตำแหน่งของภาพแต่ละครั้งก็ยังคงเป็นหลักการเดิมในเรื่องเลนส์



รูป 11.67 แผนภาพรังสีของแสงสำหรับเลนส์ประกอบ

ตัวอย่าง 11.14 เลนส์นูนสองอันประกอบด้วยเลนส์ที่หนึ่งมีความยาวโฟกัส 12 เซนติเมตร และเลนส์ที่สองมีความยาวโฟกัส 8 เซนติเมตร ถ้าวางอยู่ห่างกัน 20 เซนติเมตร วางวัตถุที่มีความสูง 3 เซนติเมตร ไว้ที่ระยะ 36 เซนติเมตร จากเลนส์อันที่หนึ่ง ดังรูป



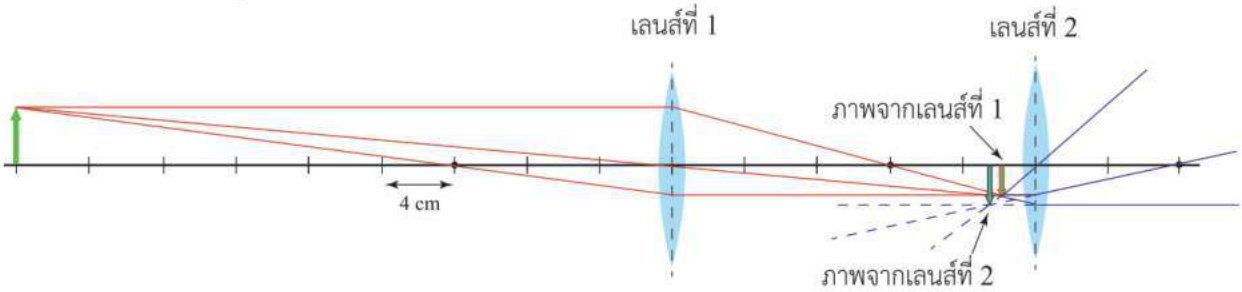
รูป ประกอบตัวอย่าง 11.14

จงหา

ก. ตำแหน่งของภาพเมื่อผ่านเลนส์ที่สอง

ข. ขนาดของภาพเมื่อผ่านเลนส์ที่สอง

ก. แนวคิด การนำเลนส์หลายอันมาประกอบกันภาพที่เกิดจากเลนส์อันแรกจะกลายเป็นวัตถุของเลนส์อันที่สอง ดังรูป



รูปประกอบแนวคิดสำหรับตัวอย่าง 11.14

วิธีทำ จาก สมการสำหรับเลนส์บาง $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}$

สำหรับเลนส์ที่หนึ่ง: แทนค่า $s_1 = 36\ \text{cm}, f_1 = 12\ \text{cm}$ จะได้

$$\frac{1}{36\,\text{cm}}+\frac{1}{s_1'}=\frac{1}{12\,\text{cm}}$$

$$\frac{1}{s_1'}=\frac{1}{12\,\text{cm}}-\frac{1}{36\,\text{cm}}$$

$$=\frac{3-1}{36\,\text{cm}}$$

$$=\frac{1}{18\,\text{cm}}$$

ดังนั้น $s_1' = +18\,\text{cm}$ โดยที่เครื่องหมายบวก แสดงว่าเป็นภาพจริงที่อยู่ด้านหลังของเลนส์ที่หนึ่งเป็นระยะ 18 cm

สำหรับเลนส์ที่สอง: $f_2 = +8$ cm และภาพที่เกิดจากเลนส์ที่หนึ่งที่จุด P′ กลายเป็นวัตถุสำหรับเลนส์ที่สอง ทำให้ได้ระยะวัตถุสำหรับเลนส์ที่สองเป็น 20 cm – 18 cm = 2 cm แทนค่าลงในสมการของเลนส์บาง จะได้

$$\frac{1}{2\,\text{cm}} + \frac{1}{s_2'} = \frac{1}{8\,\text{cm}}$$

$$\frac{1}{s_1'} = \frac{1}{8\,\text{cm}} - \frac{1}{2\,\text{cm}}$$

$$= \frac{1-4}{8\,\text{cm}}$$

$$= \frac{-3}{8\,\text{cm}}$$

ดังนั้น $s_2' = -2.67\,\text{cm}$ โดยที่เครื่องหมายลบ แสดงว่าเป็นภาพเสมือนที่อยู่ด้านหน้าของเลนส์ที่สองเป็นระยะ 2.67 cm

ตอบ ภาพที่เกิดขึ้นมีตำแหน่งอยู่หน้าเลนส์ที่สองเป็นระยะ 2.67 เซนติเมตร

ข. แนวคิด การนำเลนส์หลายอันมาประกอบกันภาพที่เกิดจากเลนส์ที่หนึ่งจะกลายเป็นวัตถุของเลนส์ที่สอง

วิธีทำ จาก กำลังขยายของเลนส์บาง $M = \dfrac{y'}{y} = -\dfrac{s'}{s}$

สำหรับเลนส์ที่หนึ่ง: แทนค่า $y_1 = 3$ cm, $s_1 = 36$ cm, $s_1' = 18$ cm จะได้

$$M_1 = -\frac{18\,\text{cm}}{36\,\text{cm}}$$

$$= -0.5$$

กำลังขยาย $M_1 = -0.5$ โดยที่เครื่องหมายลบ แสดงว่าเป็นภาพจริงหัวกลับอยู่ด้านหลังของเลนส์ โดยภาพที่เกิดจากเลนส์ที่หนึ่งมีความสูงเท่ากับ $0.5 \times 3\,\text{cm} = 1.5\,\text{cm}$

สำหรับเลนส์ที่สอง: แทนค่า $y_2 = -1.5$ cm, $s_2 = 2$ cm, $s_2' = -2.67$ cm จะได้

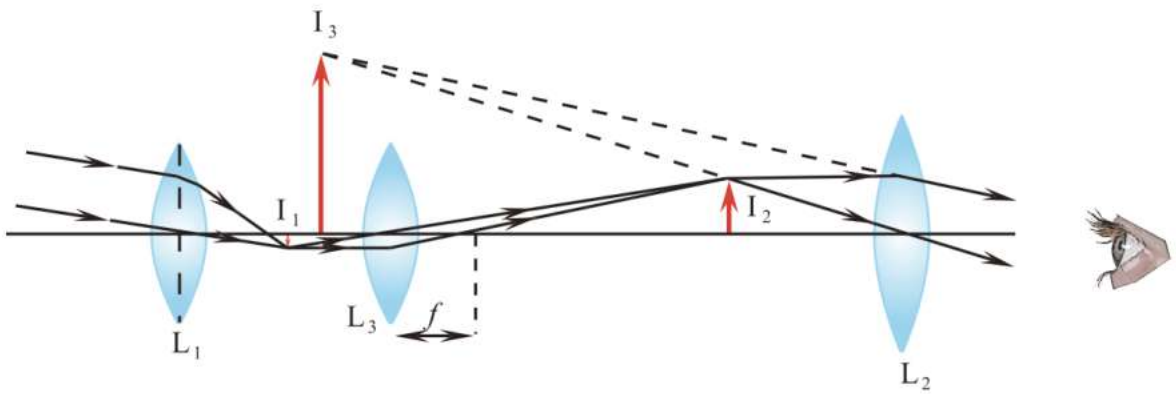
$$M_1 = -\frac{(-2.67 \text{ cm})}{2 \text{ cm}}$$

$$= 1.335$$

กำลังขยาย $M_1 = 1.335$ โดยที่เครื่องหมายบวก แสดงว่าเป็นภาพเสมือนหัวตั้งอยู่ด้านหน้าของเลนส์ที่สอง นั่นคือ ภาพที่เกิดขึ้นวางตัวในทิศเดียวกับภาพที่เกิดจากเลนส์ที่หนึ่ง (หัวกลับ) และภาพที่เกิดจากเลนส์ที่สองมีความสูงเท่ากับ $1.5 \times 1.335 \text{ cm} = 2.0025 \text{ cm}$

ตอบ ภาพเมื่อผ่านเลนส์ที่สองมีความสูงเท่ากับ 2.0 เซนติเมตร โดยเป็นภาพเสมือนหัวกลับ

กล้องโทรทรรศน์ประกอบด้วยเลนส์นูนสองอัน คือ เลนส์ใกล้วัตถุซึ่งมีความยาวโฟกัสมาก และเลนส์ใกล้ตาซึ่งมีความยาวโฟกัสน้อย โดยระยะระหว่างเลนส์ทั้งสองซึ่งเป็นความยาวของกล้องโทรทรรศน์โดยทั่วไปจะมีค่าเท่ากับผลรวมของความยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง เมื่อใช้กล้องโทรทรรศน์ส่องดูวัตถุที่อยู่ไกล รังสีขนานจากวัตถุจะผ่านเลนส์ใกล้วัตถุ แล้วมาตัดกันที่หลังเลนส์ จากนั้นภาพที่เกิดจากเลนส์ใกล้วัตถุนี้จะเป็นวัตถุของเลนส์ใกล้ตา ซึ่งจะได้ภาพเสมือนขนาดขยาย และเป็นภาพหัวกลับ ดังนั้น ถ้าต้องการทำให้ภาพที่เห็นเป็นภาพหัวตั้งก็อาจทำได้โดยนำเลนส์อีกอันหนึ่งมาวางระหว่างเลนส์ใกล้ตากับเลนส์ใกล้วัตถุ ดังรูป 11.68



รูป 11.68 การนำ เลนส์ L_3 มาวางระหว่างเลนส์ใกล้วัตถุ L_1 และเลนส์ใกล้ตา L_2

กล้องจุลทรรศน์

กล้องจุลทรรศน์ (microscope) ประกอบด้วยเลนส์นูนสองอันเป็นทัศนอุปกรณ์ที่ใช้ส่องวัตถุขนาดเล็ก ๆ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น ทำให้เราสามารถเห็นสิ่งดังกล่าวได้อย่างละเอียดและชัดเจน ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์มีอะไรบ้าง และขยายภาพได้อย่างไร ศึกษาได้จากกิจกรรม 11.7

กิจกรรม 11.7 กล้องจุลทรรศน์

จุดประสงค์

อธิบายหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์

วัสดุและอุปกรณ์

1. ชุดกล้องโทรทรรศน์และจุลทรรศน์ 1 กล่อง
2. ไม้เมตร 1 อัน
3. แผ่นกระดาษแข็งทึบแสง 1 แผ่น
4. แผ่นกระดาษฝ้า 1 แผ่น
5. ตัวอย่างภาพสไลด์ 1 ชุด
6. ไม้เมตร 1 อัน

รูป การศึกษาการทำงานกล้องจุลทรรศน์

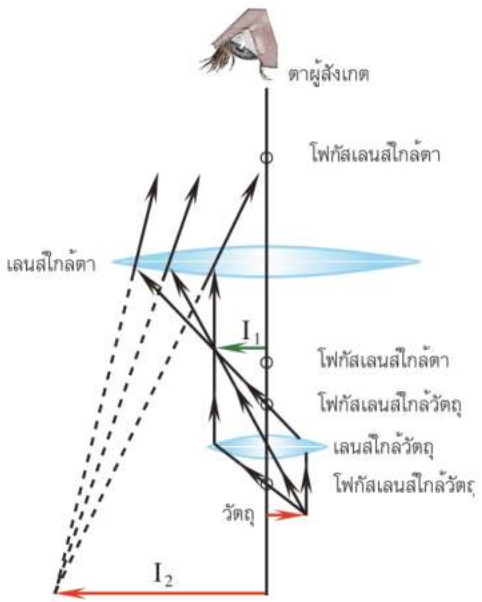
วิธีทำกิจกรรม

1. ตัดแผ่นกระดาษแข็งทึบแสงกว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร และเจาะรูเป็นรูปลูกศรสูงประมาณ 0.3 เซนติเมตรที่บริเวณกลางกระดาษ ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า แผ่นลูกศร นำแผ่นลูกศรไปเสียบหน้ากล่องแสง
2. นำเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสสั้นใส่ลงในรางแล้วนำไปวางหน้าแผ่นลูกศร โดยให้ระยะระหว่างเลนส์นูนกับแผ่นลูกศรมากกว่าความยาวโฟกัสของเลนส์นูนเล็กน้อย
3. ตัดแผ่นกระดาษฝ้ากว้าง 6 เซนติเมตร และยาว 6 เซนติเมตร นำไปเสียบไว้กับที่เสียบฉากบนราง ส่วนนี้จะเรียกว่า แผ่นฉาก
4. จัดแผ่นฉากให้รับภาพลูกศรจะได้ภาพบนฉากเป็นภาพจริงหัวกลับขนาดขยาย
5. นำเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสยาวไปวางห่างจากแผ่นฉาก มองภาพที่แผ่นฉากจนเห็นภาพขนาดขยาย
6. เปลี่ยนแผ่นลูกศรโดยใช้ภาพสไลด์ที่มีกระดาษฝ้าปิดทับด้านหลังแล้วดูภาพสไลด์ผ่านเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสมากโดยไม่ต้องมีแผ่นฉากกั้น

คำถามท้ายกิจกรรม

- ☐ ขนาดและลักษณะของภาพเป็นอย่างไรเมื่อมองผ่านเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัสยาว
- ☐ ระยะระหว่างเลนส์ทั้งสองมีค่าเท่าใด และระยะนี้แตกต่างจากความยาวโฟกัสของเลนส์นูนทั้งสองอย่างไร

กล้องจุลทรรศน์ประกอบด้วยเลนส์นูนสองอัน โดยถ้าความยาวโฟกัสของเลนส์ทั้งสอง ระยะห่างระหว่างเลนส์ และระยะวัตถุที่เหมาะสม จะสามารถทำให้เกิดภาพที่มีกำลังขยายสูงเกินกว่า 100 เท่าได้ เลนส์ใกล้วัตถุของกล้องจุลทรรศน์มักจะมีความยาวโฟกัสน้อย ๆ เช่น 1 เซนติเมตร และจะวางวัตถุให้มีระยะมากกว่าความยาวโฟกัสเพียงเล็กน้อย เพื่อให้เกิดภาพจริงหัวกลับขนาดขยาย ส่วนเลนส์ใกล้ตาจะทำหน้าที่คล้ายกับแว่นขยายโดยใช้ภาพจากเลนส์ที่อยู่ใกล้วัตถุเป็นวัตถุให้กับเลนส์ใกล้ตา ทำให้เกิดภาพเสมือนหัวกลับขนาดขยายที่ตำแหน่งหน้าเลนส์ใกล้ตา ดังรูป 11.69

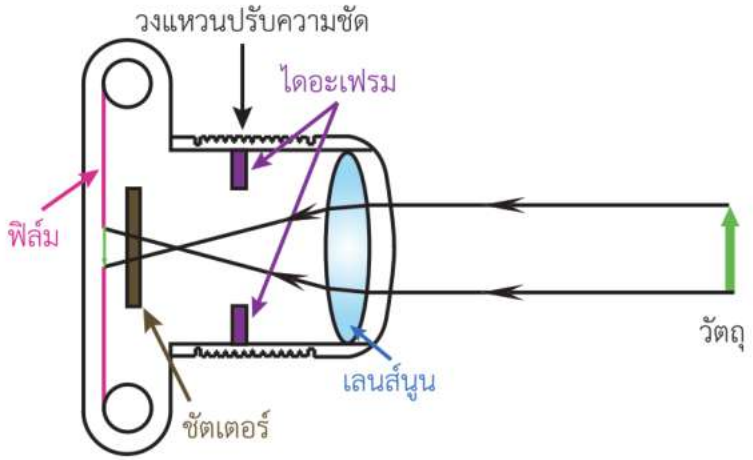


รูป 11.69 แผนภาพรังสีของแสงสำหรับกล้องจุลทรรศน์

กล้องถ่ายรูป

หลักการทำงานของกล้องถ่ายรูปอย่างง่ายจะมีเลนส์นูนที่ทำหน้าที่รับภาพจากวัตถุที่อยู่ไกลกว่าระยะ $2f$ ภาพที่เกิดขึ้นจะเป็นภาพจริงหัวกลับขนาดลดลง แต่แทนที่จะใช้แผ่นกระดาษแข็งสีขาวรับภาพก็ใช้เป็น**ฟิล์มถ่ายรูป** (photographic film) ดังรูป 11.70 เมื่อแสงจากวัตถุตกกระทบฟิล์มจะเกิดปฏิกิริยาเคมี และเมื่อนำฟิล์มไปล้างตามกรรมวิธีทางเคมีแล้วก็จะได้ภาพตามที่ต้องการ การปรับความชัดของภาพสามารถทำได้โดยการหมุนที่**วงแหวนปรับความชัด**ซึ่งจะเป็นการเลื่อนเลนส์นูนออกห่างหรือเข้าใกล้บริเวณที่เกิดภาพ และใช้**ช่องมองภาพ**ในการจัดองค์ประกอบของภาพและใช้ตรวจสอบความชัดเจน

ของภาพ นอกจากนี้ฟิลม์ถ่ายรูปจะทำงานได้ดีหากมีปริมาณแสงที่พอเหมาะ จึงต้องมีอุปกรณ์ควบคุมปริมาณแสง ได้แก่ **ไดอะแฟรม** (diaphragm) เป็นช่องกลมที่ปรับขนาดได้ทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของแสงที่เข้ามาในกล้อง **ชัตเตอร์** (shutter) เป็นแผ่นทึบแสงทำหน้าที่ปิดและเปิดให้แสงผ่านเข้ามาในกล้อง โดยเราสามารถตั้งช่วงเวลาการเปิดและปิดได้ด้วยการปรับความเร็วชัตเตอร์ ถ้าวัตถุมีความสว่างมาก เราต้องลดขนาดช่องของไดอะแฟรมหรือเพิ่มความเร็วชัตเตอร์ แต่ถ้าวัตถุมีความสว่างน้อย เราต้องเพิ่มขนาดของไดอะแฟรมหรือลดความเร็วชัตเตอร์



รูป 11.70 ส่วนประกอบกล้องถ่ายรูปอย่างง่าย

ส่วนประกอบดังกล่าวเป็นอุปกรณ์พื้นฐานของกล้องถ่ายรูปอย่างง่าย สำหรับกล้องถ่ายรูปที่มีคุณภาพดีจะมีอุปกรณ์อื่น ๆ ประกอบอีกมากมาย ในปัจจุบันการผลิตกล้องถ่ายรูปมีการพัฒนาเป็นกล้องดิจิทัลซึ่งใช้**เซนเซอร์รับภาพ** (sensor) แทนฟิล์มรับภาพ พื้นที่ผิวของเซนเซอร์รับภาพทั้งหมดจะถูกแบ่งออกเป็นจุดเล็ก ๆ เรียกว่า **พิกเซล** (pixel) แต่ละพิกเซลบันทึกข้อมูลได้หนึ่งจุดภาพ ทำให้จำนวนพิกเซลของเซนเซอร์รับภาพของกล้องมีผลต่อความละเอียดของภาพ

คำถามตรวจสอบความเข้าใจ 11.5

1. ดวงจันทร์สามารถเกิดการทรงกลดได้หรือไม่ ถ้าได้จะเกิดขึ้นเมื่อไร
2. การเกิดรุ้งปฐมภูมิและการเกิดรุ้งทุติยภูมิเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร
3. เหตุใดภาพที่เกิดจากกล้องโทรทรรศน์ที่ประกอบด้วยเลนส์นูนจำนวน 2 เลนส์ จึงเป็นภาพหัวกลับ และถ้าต้องการทำให้ภาพที่เกิดขึ้นไม่เป็นภาพหัวกลับด้วยการเพิ่มเลนส์นูนจำนวน 1 เลนส์ จะต้องนำเลนส์นูนนี้ไปวางไว้ที่ตำแหน่งใด

สรุปเนื้อหาภายในบทเรียน

11.1 การสะท้อนและการหักเหของแสง

- เมื่อแสงตกกระทบผิววัตถุจะเกิดการสะท้อนของแสง โดยเป็นไปตามกฎการสะท้อน ดังนี้
  1. มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน
  2. รังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และเส้นแนวฉาก อยู่ในระนาบเดียวกัน
- เมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางโปร่งใสคู่หนึ่งๆ จะเกิดการหักเหของแสง โดยเป็นไปตามกฎการหักเห ดังนี้
  1. $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$
  2. รังสีตกกระทบ รังสีหักเห และเส้นแนวฉากจะอยู่ในระนาบเดียวกัน
- สำหรับตัวกลางคู่หนึ่ง อัตราส่วนระหว่างไซน์ของมุมตกกระทบกับไซน์ของมุมหักเหมีค่าคงตัวค่าหนึ่ง เรียกความสัมพันธ์นี้ว่า กฎของสเนลล์
- เมื่อแสงเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่งที่มีดรรชนีหักเหมากเข้าไปอีกตัวกลางหนึ่งที่มีดรรชนีหักเหน้อย จะทำให้รังสีหักเหเบนออกจากเส้นแนวฉาก โดยมุมของรังสีตกกระทบมุมหักเหมีค่าเท่ากับ 90 องศา เรียกว่า มุมวิกฤต และถ้ามุมของรังสีตกกระทบมีขนาดใหญ่กว่ามุมวิกฤต จะไม่มีรังสีหักเห มีแต่รังสีสะท้อน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสะท้อนกลับหมด
- แสงขาวประกอบด้วยแสงสีต่างๆ เมื่อแสงขาวผ่านปริซึมจะเกิดการกระจายแสงเป็นแสงสีต่าง ๆ เนื่องจากดรรชนีหักเหของวัสดุที่ใช้ทำปริซึมสำหรับแสงแต่ละสีมีค่าไม่เท่ากัน เรียกแถบของแสงสีที่เกิดจากการแยกแสงขาวว่า สเปกตรัม

11.2 การมองเห็นและการเกิดภาพ

- มนุษย์มองเห็นวัตถุได้เนื่องจากแสงจากวัตถุนั้นมาเข้าตา และการที่ตาสามารถแยกได้ว่าแสงมาจากส่วนไหนของวัตถุเนื่องจากมีเลนส์ตาทำหน้าที่ช่วยให้แสงเหล่านี้ไปรวมกันที่บนจอตา โดยแสงที่มาจากแหล่งกำเนิดแต่ละจุดจะไปรวมกันที่จอตาในตำแหน่งที่ต่างกัน การรับรู้บนจอตาจะส่งสัญญาณให้สมองแปลความหมายทำให้มองเห็นวัตถุได้
- เมื่อมีวัตถุที่สะท้อนแสงได้ดี เช่น กระจกเงาราบ ทำให้มีการเปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงที่ออกจากวัตถุ แล้วเคลื่อนที่ทางมาเข้าตา จะทำให้เห็นภาพตรงตำแหน่งที่แนวรังสีที่เข้าตาตัดกัน แม้อาจไม่พบวัตถุจริงที่ตำแหน่งนั้น

- ถ้าวางวัตถุหน้ากระจกเงาราบ จะเกิดภาพของวัตถุอยู่ด้านหลังกระจก โดยความสัมพันธ์ระหว่างระยะภาพ (s') ระยะวัตถุ (s) คือ $s' = s$
- เมื่อรอยต่อระหว่างตัวกลางที่มีดรรชนีหักเหต่างกัน ทำให้มีการเปลี่ยนเส้นทางเดินของแสงที่ออกจากวัตถุ แล้วเคลื่อนที่มาเข้าตา จะทำให้เห็นภาพตรงตำแหน่งที่แนวรังสีที่เข้าตาตัดกัน แม้อาจไม่พบวัตถุจริงที่ตำแหน่งนั้น เช่น การมองวัตถุที่อยู่ในน้ำ จะเห็นวัตถุอยู่ตื้นกว่าเดิม โดยระยะทางจากผิวน้ำถึงตำแหน่งวัตถุ เรียกว่า ความลึกจริง และระยะทางจากผิวน้ำถึงตำแหน่งภาพ เรียกว่า ความลึกปรากฏ

11.3 ภาพจากเลนส์บางและกระจกเงาทรงกลม

- การระบุตำแหน่งและชนิดของภาพที่เกิดจากการหักเหของแสงผ่านเลนส์บาง ได้แก่ เลนส์นูนและเลนส์เว้า สามารถทำได้โดยการเขียนรังสีของแสงและการคำนวณ โดยที่
  1. ระยะวัตถุ (s) ระยะภาพ (s') และความยาวโฟกัส (f) มีความสัมพันธ์ดังสมการ $\frac{1}{s}+\frac{1}{s'}=\frac{1}{f}$ เรียกว่า สมการของเลนส์บาง
  2. ขนาดวัตถุ (y) และขนาดภาพ (y') หาได้จากกำลังขยาย $M=\frac{y'}{y}=-\frac{s'}{s}$
- การระบุตำแหน่งและชนิดของภาพที่เกิดจากการสะท้อนของแสงผ่านกระจกเงาทรงกลม ได้แก่ กระจกโค้งเว้าและกระจกโค้งนูน สามารถทำได้โดยการเขียนรังสีของแสงและการคำนวณ

11.4 แสงสีและการมองเห็นแสงสี

- มนุษย์มองเห็นสีต่าง ๆ เป็นเพราะในจอตามีเซลล์รูปกรวย 3 ชนิด คือ ชนิด S ชนิด M และ ชนิด L ซึ่งมีการตอบสนองต่อแสงที่มีช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ ที่แตกต่างกันไป ถ้าเซลล์รูปกรวยชนิดใดชนิดหนึ่งหรือมากกว่ามีความบกพร่อง จะมองเห็นสีแตกต่างไปจากคนปกติ เรียกความบกพร่องนี้ว่า การบอดสี
- แสงทั้ง 3 สี คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน จัดว่าเป็นแสงสีปฐมภูมิ เพราะสามารถทำให้เซลล์รูปกรวยทำงานในรูปแบบต่าง ๆ กัน และสามารถผสมกันให้เป็นแสงสีต่าง ๆ ได้
- สารในวัตถุที่ทำหน้าที่ดูดกลืนแสงสีบางแสงสีและสะท้อนแสงสีส่วนที่เหลือทำให้เห็นวัตถุเป็นสีต่าง ๆ เรียกว่า สารสี โดยสารสีทั้ง 3 สี คือ สารสีเหลือง สารสีแดงม่วง และสารสีน้ำเงินเขียว จัดว่าเป็นสารสีปฐมภูมิเพราะสามารถผสมกันให้ได้สีต่าง ๆ ครบทุกสี

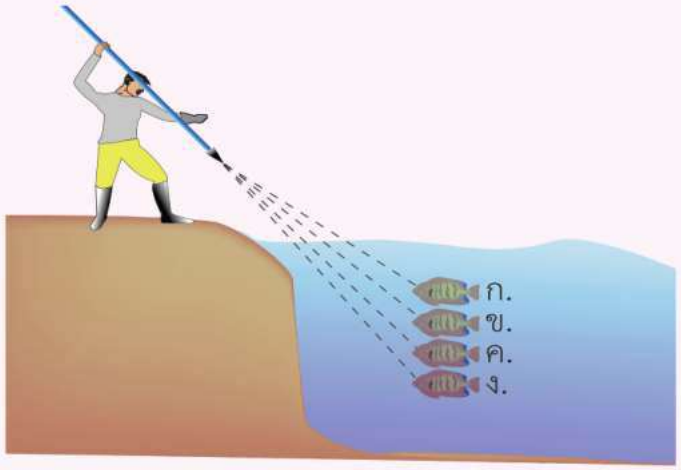
11.5 ปรากฏการณ์ธรรมชาติและการใช้ประโยชน์เกี่ยวกับแสง

- รุ้งเกิดจากการที่แสงอาทิตย์หักเหและสะท้อนผ่านละอองน้ำ ทำให้เกิดการกระจายแสงได้สเปกตรัมของแสงขาว
- การทรงกลดเกิดจากการที่แสงอาทิตย์หักเหและเกิดการกระจายแสงผ่านผลึกน้ำแข็งในก้อนเมฆ ทำให้เกิดแถบสีของแสงเป็นวงกลมรอบดวงอาทิตย์หรือดวงจันทร์
- มิราจเกิดจากการหักเหของแสงในอากาศชั้นต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิมาก ๆ ทำให้เห็นภาพของวัตถุปรากฏขึ้น เช่น เห็นภาพท้องฟ้าปรากฏบนถนนที่ร้อนมาก ๆ
- การกระเจิงของแสง เป็นปรากฏการณ์ที่แสงตกกระทบอนุภาคหรือโมเลกุลของอากาศ ทำให้แสงกระจัดกระจายไปโดยรอบ ซึ่งแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น เช่น แสงม่วง และแสงสีน้ำเงิน จะกระเจิงได้ดีกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นยาว เช่น แสงสีแดง
- ความรู้เรื่องหลักการทางแสง เช่น การสะท้อน และการหักเหของแสง นำมาใช้สร้างทัศนอุปกรณ์ซึ่งเป็นเครื่องมือและอุปกรณ์ทางแสงที่เป็นประโยชน์หลายอย่าง เช่น กล้องโทรทรรศน์ กล้องจุลทรรศน์ และกล้องถ่ายรูป

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 11

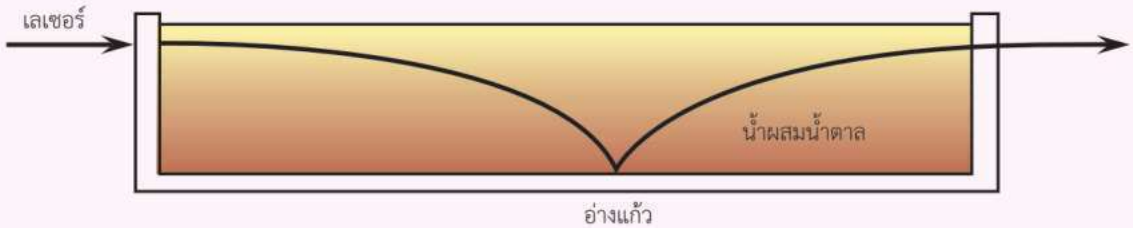
คำถาม

1. ชายคนหนึ่งกำลังล่าปลาโดยใช้ไม้ปลายแหลม ถ้าเขามองเห็นปลาที่ตำแหน่ง ค. เขาต้องพุ่งไม้ไปที่ตำแหน่งใด จึงมีโอกาสถูกตัวปลา



รูป ประกอบคำถามข้อ 1

2. เมื่อฉายแสงเลเซอร์เข้าไปในน้ำที่ผสมน้ำตาล ปรากฏว่าแนวของลำแสงเบนดังรูป จงอธิบายว่าเหตุใดจึงเป็นเช่นนั้น



รูป ประกอบคำถามข้อ 2

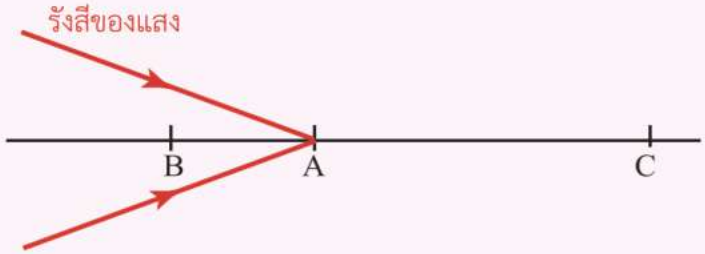
3 ในตอนเช้า ขณะดวงอาทิตย์ยังไม่ขึ้นจากขอบฟ้า และในตอนเย็น ขณะที่ดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้าไปแล้ว เราสามารถมองเห็นดวงอาทิตย์ได้ เพราะเหตุใด

4. จงอธิบายการเกิดการกระจายของแสงขาว เมื่อตกกระทบผิวด้านหนึ่งของปริซึมสามเหลี่ยม

5. กระจกเงาราบทำให้เกิดภาพจริงได้หรือไม่ เพราะเหตุใด

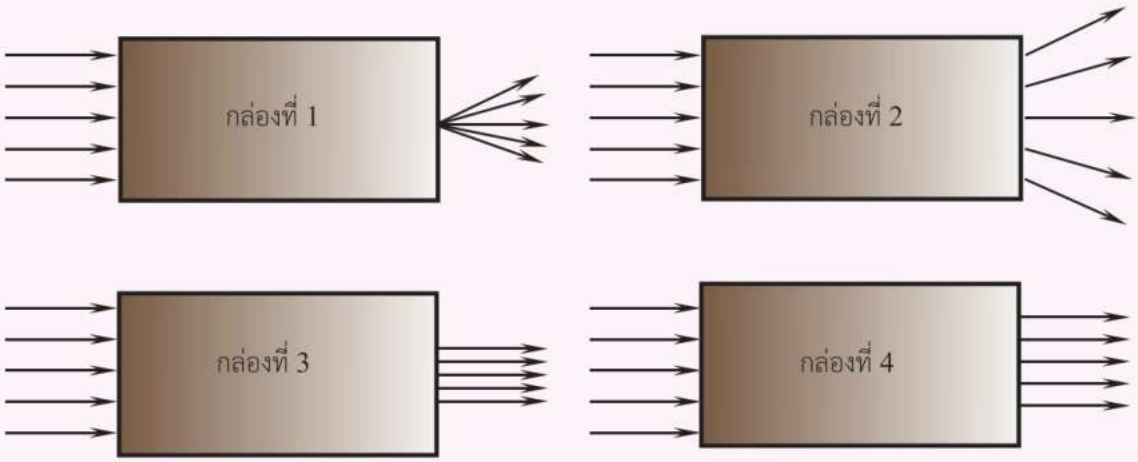
6. เมื่อส่องกระจกเงาราบจะมองเห็นภาพสลับซ้ายเป็นขวา แต่ทำไมจึงไม่เห็นภาพกลับจากบนเป็นล่าง และจากล่างเป็นบน

7. ฉายแสงขนานผ่านเลนส์นูนบางในน้ำทำให้แสงรวมกันที่โฟกัส ความยาวโฟกัสของเลนส์นูนที่ได้เปลี่ยนแปลงไปจากการฉายแสงขนานผ่านเลนส์นูนบางในอากาศหรือไม่ อย่างไร
8. รังสีของแสงเบนเข้าหากันที่จุด A ถ้านำเลนส์ไปวางไว้ที่จุด B รังสีของแสงคู่นี้จะเบนไปพบกันที่จุด C เลนส์ที่นำไปวางเป็นเลนส์ชนิดใด จงอธิบาย



รูป ประกอบคำถามข้อ 8

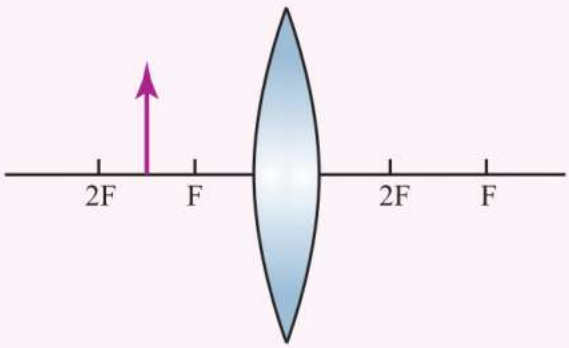
9. ถ้าต้องการให้ลำแสงสีเดียวส่องขนานเข้าไปในกล่องที่ภายในมีเลนส์บรรจุอยู่แล้วทำให้รังสีทะลุออกมามีลักษณะต่าง ๆ ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 9

จงหาชนิดของเลนส์ที่อยู่ในกล่องแต่ละกล่อง โดยในแต่ละกล่องอาจมีเลนส์มากกว่า 1 อันก็ได้

10. นำวัตถุไปวางที่ตำแหน่งระหว่าง F กับ 2F ของเลนส์นูนบาง ภาพที่เกิดโดยเลนส์นี้มีลักษณะอย่างไร กำหนดให้ F เป็นโฟกัสของเลนส์



รูป ประกอบคำถามข้อ 10

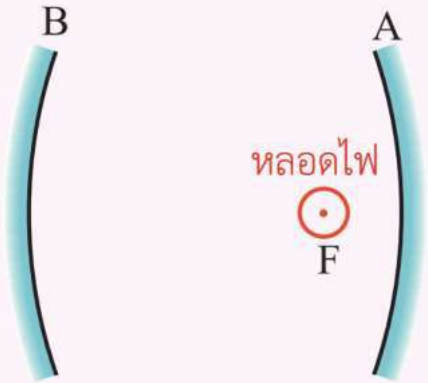
11. เมื่อแสงผ่านละอองฝนและปริซึมจะเกิดสเปกตรัมของแสง การเกิดสเปกตรัมของแสงทั้งสองกรณีเป็นเพราะสมบัติใดของแสง
12. ภาพของวัตถุที่วางหน้ากระจกเงาราบ เป็นภาพเสมือนเสมอ เพราะเหตุใด
13. ภาพของวัตถุที่วางหน้ากระจกโค้งนูน เป็นภาพเสมือนเสมอ เพราะเหตุใด
14. ถ้าใช้กระจกโค้งเว้าเป็นกระจกมองข้างหลังสำหรับรถยนต์จะเกิดปัญหาอะไรบ้าง
15. สุภาพสตรีผู้หนึ่งยืนหน้ากระจกโค้งเว้าที่มีความยาวโฟกัส 30 เซนติเมตร เธอจะต้องทำอย่างไรจึงจะเห็นภาพใบหน้าขยายขนาดขึ้นกว่าปกติ และภาพใบหน้าของเธอจะปรากฏอยู่ที่ไหน
16. แหล่งกำเนิดแสงเป็นจุดเล็ก ๆ วางห่างหน้ากระจกเว้า 15 เซนติเมตร แสงจากแหล่งกำเนิดนี้เมื่อกระทบกระจกจะสะท้อนออกจากกระจกและขนานกัน ความยาวโฟกัสของกระจกเป็นเท่าไร
17. กระจกในข้อใด ต่อไปนี้ที่สามารถทำให้เกิดภาพเสมือนที่มีขนาดใหญ่กว่าวัตถุ ให้เขียนทางเดินของแสงประกอบคำอธิบาย

    ก. กระจกเงาราบ

    ข. กระจกโค้งนูน

    ค. กระจกโค้งเว้า

18. วางหลอดไฟที่โฟกัส F ของกระจกโค้งเว้า A แล้วนำกระจกโค้งเว้า B มารับแสงจากกระจกโค้งเว้า A ดังรูป



รูป ประกอบคำถามข้อ 18

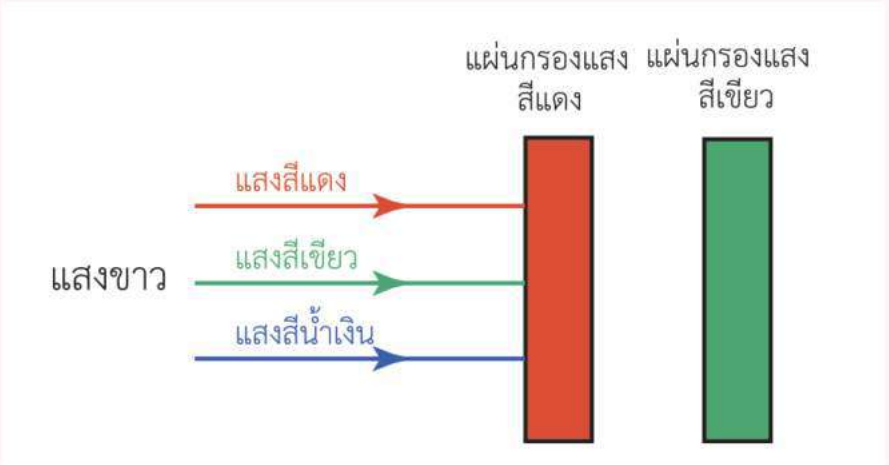
ภาพของหลอดไฟนี้ที่เกิดจากกระจกโค้งเว้า B จะเกิด ณ ตำแหน่งใดบ้าง และเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน

19 สารสีปฐมภูมิประกอบด้วยสารสีใดบ้าง เมื่อผสมสารสีปฐมภูมิทีละคู่จะได้สารสีใดบ้าง

20. ถ้าฉายแสงเหลืองไปที่วัตถุสีขาว จะมองเห็นวัตถุเป็นสีอะไร

21. ถ้าให้แสงสีต่าง ๆ ตกกระทบวัตถุทึบแสง จะเห็นสีของวัตถุต่างกันหรือไม่ เพราะเหตุใด

22. ถ้ามองแสงขาวผ่านแผ่นกรองแสงสีแดงและสีเขียวที่วางซ้อนกัน ดังรูป



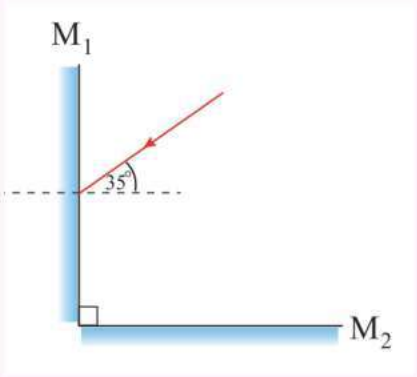
รูป ประกอบคำถามข้อ 22

แสงสีใดจะผ่านแผ่นกรองแสงสีมาเข้าตา

23. เมื่อฉายวัตถุด้วยแสงขาว เห็นวัตถุ A มีสีขาว และวัตถุ B มีสีเขียว โดยที่วัตถุทั้งสองเป็นวัตถุทึบแสง ถ้าฉายวัตถุด้วยแสงสีแดง จะเห็นวัตถุ A และ B เป็นสีอะไร
24. รถ 4 คัน เมื่อมองในแสงขาว จะเห็นเป็นสีดำ สีเหลือง สีแดง และสีน้ำเงิน ถ้านำรถทั้ง 4 คันนี้ไปจอดในบริเวณที่มีแสงไฟสีเหลือง จะเห็นรถเป็นสีอะไร ตามลำดับ
25. ถ้านำสารสีเหลืองมาผสมกับสารสีน้ำเงินเขียว และฉายแสงสีแดงลงไปจะเห็นเป็นสีอะไร
26. วัตถุชิ้นหนึ่งอยู่ในที่มืด เมื่อฉายแสงสีแดงไปยังวัตถุนั้นเห็นวัตถุมีสีแดง เมื่อฉายแสงสีเขียวไปยังวัตถุนั้นเห็นวัตถุมีสีเขียว เมื่อนำวัตถุนั้นออกมาในห้องที่มีแสงขาว จะเห็นวัตถุนั้นมีสีอะไร
27. เพราะเหตุใด ไฟสัญญาณเตือนอันตรายจึงนิยมใช้แสงสีแดง

ปัญหา

1. ถ้ายืนส่องกระจกเงาราบในแนวตั้งฉากกับกระจกเงาราบเป็นระยะ 1.0 เมตร จากนั้นถอยห่างจากกระจกเงาราบไปในแนวตั้งฉากกับกระจกเงาราบอีก 0.5 เมตร จะสังเกตเห็นภาพของตัวเองในกระจกเงาราบห่างจากตัวเป็นระยะเท่าใด
2. กระจกเงาราบ M_1 และ M_2 วางทำมุมฉากกัน มีรังสีตกกระทบที่กระจก M_1 ทำมุมตกกระทบเป็น 35 องศา ดังรูป

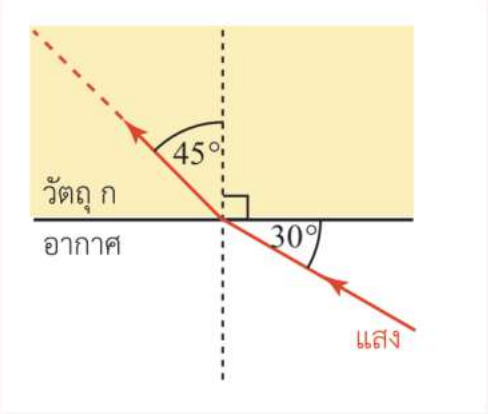


รูป ประกอบปัญหาข้อ 2

รังสีสะท้อนจากกระจกเงาราบ M_2 ทำมุมสะท้อนเท่าใด

3. กระจกเงาราบสองบานหันหน้าเข้าหากันทำมุม 70 องศา ถ้ารังสีของแสงตกกระทบกระจกบานแรกเป็นมุม 30 องศากับกระจก รังสีของแสงที่สะท้อนออกจากกระจกบานที่สองทำมุมกี่องศากับกระจกบานที่สอง
4. ชายคนหนึ่งสูง 1.80 เมตร ต้องการกระจกเงาราบเพื่อจะใช้ส่องมองเห็นได้ตลอดตัว จงหา
   ก. ความสูงน้อยที่สุดของกระจกเงาราบ
   ข. ระยะที่ชายคนนี้ต้องยืนห่างจากกระจกเงาราบ
   ค. หากชายคนนี้ ยืนห่างจากกระจกเงาราบมากกว่าระยะในข้อ ข. ภาพที่ปรากฏบนกระจกเงาราบจะมีขนาดเป็นอย่างไร

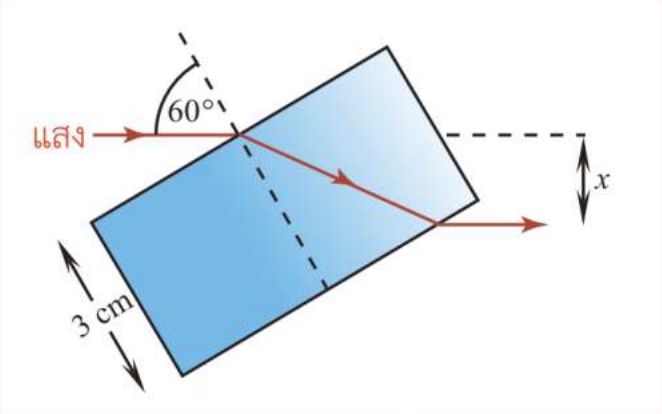
5. แสงเดินทางจากอากาศเข้าสู่วัตถุโปร่งใส ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 5

จงหาดรรชนีหักเหของวัตถุนี้

6. รังสีของแสงในอากาศตกกระทบผิวน้ำทำมุมตกกระทบ 43 องศา จงหามุมสะท้อนและมุมหักเห
7. นำแท่งพลาสติกสี่เหลี่ยมกว้าง 3 เซนติเมตร ขวางทางเดินของแสง ทำให้แสงมีการหักเห ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาข้อ 7

จงหาระยะ x ถ้าพลาสติกมีดรรชนีหักเหเท่ากับ 1.50

8. จงหามุมวิกฤตของน้ำเมื่อแสงเคลื่อนที่จากน้ำไปยังอากาศ ถ้ากำหนดให้ดรรชนีหักเหของน้ำและอากาศเท่ากับ 1.33 และ 1.00 ตามลำดับ
9. จงหามุมวิกฤตของเพชรเมื่อแสงเคลื่อนที่จากเพชรไปยังน้ำ ถ้ากำหนดให้ดรรชนีหักเหของเพชรและของน้ำเท่ากับ 2.42 และ 1.33 ตามลำดับ
10. ถังน้ำสูง 1.00 เมตร เมื่อบรรจุน้ำเต็มถัง แล้วมองลงไปตรง ๆ จะเห็นก้นถังมีความลึกจากผิวน้ำเท่าใด ถ้ากำหนดให้ดรรชนีหักเหของน้ำเท่ากับ 1.33

11. จงเขียนแผนภาพแสดงการเกิดภาพ และระบุชนิดภาพที่เกิดขึ้นว่าเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน ในกรณีวัตถุอยู่หน้าเลนส์นูนและเลนส์เว้า โดยวัตถุวางตั้งฉากกับเส้นแกนมุขสำคัญของเลนส์ และวัตถุอยู่ห่างจากเลนส์ทั้งสองเป็นระยะต่าง ๆ กัน ดังนี้

ก. $s > 2f$ ข. $s = 2f$ ค. $f < s < 2f$ ง. $s = f$ จ. $s < f$

12. ต้องการใช้แว่นขยายที่มีความยาวโฟกัส 12 เซนติเมตรอ่าน ทำให้ตัวหนังสือมีขนาดขยาย 4 เท่า ต้องให้แว่นขยายห่างจากตัวหนังสือเป็นระยะเท่าใด

13. วัตถุสูง 2.0 เซนติเมตร อยู่ห่างจากเลนส์นูน 20.0 เซนติเมตร เกิดภาพจริงห่างจากเลนส์ 10.0 เซนติเมตร จงหาความยาวโฟกัสของเลนส์นูนและขนาดภาพ ด้วยวิธีดังนี้

ก. การเขียนแผนภาพรังสีของแสง

ข. การคำนวณ

14. วัตถุสูง 3.0 เซนติเมตร อยู่ห่างจากเลนส์เว้า 15.0 เซนติเมตร เกิดภาพห่างจากเลนส์ 5.0 เซนติเมตร จงหาความยาวโฟกัสของเลนส์เว้าและขนาดภาพ ด้วยวิธีดังนี้

ก. การเขียนแผนภาพรังสีของแสง

ข. การคำนวณ

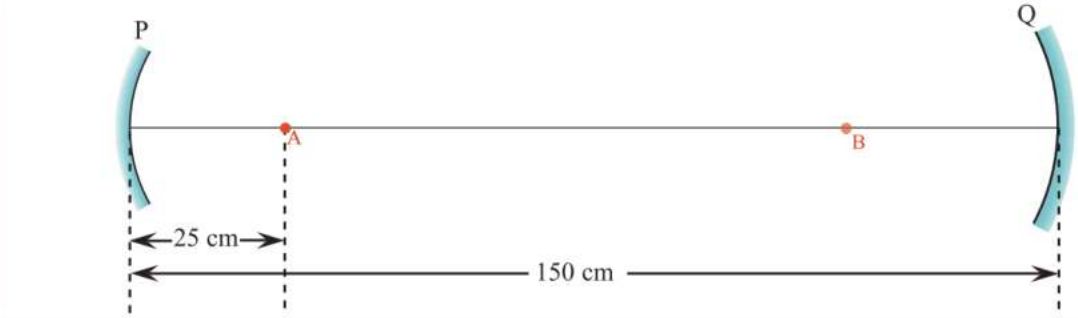
15. วางวัตถุหน้าเลนส์ 10 เซนติเมตร ได้ภาพขนาด $\frac{3}{4}$ เท่าของวัตถุ และอยู่ด้านเดียวกับวัตถุ เลนส์ที่ใช้เป็นเลนส์ชนิดใด และมีความยาวโฟกัสเท่าใด

16. วัตถุสูง 5 เซนติเมตร วางอยู่ห่างจากกระจกโค้งเว้า 10 เซนติเมตร ถ้ากระจกโค้งเว้ามีความยาวโฟกัส 25 เซนติเมตร จงหาระยะภาพ ชนิดของภาพ และขนาดของภาพ ด้วยวิธีดังนี้

ก. การเขียนแผนภาพรังสีของแสง

ข. การคำนวณ

17. กระจกโค้งเว้า P ความยาวโฟกัส 25 เซนติเมตร และกระจกโค้งเว้า Q ความยาวโฟกัส 34 เซนติเมตร วางหันหน้าเข้าหากันและห่างกัน 150 เซนติเมตร โดยมีเส้นแกนมุขสำคัญร่วมกัน ถ้านำวัตถุขนาดเล็ก ไปวางที่จุด A ซึ่งเป็นโฟกัสของกระจกโค้งเว้า P ดังรูป



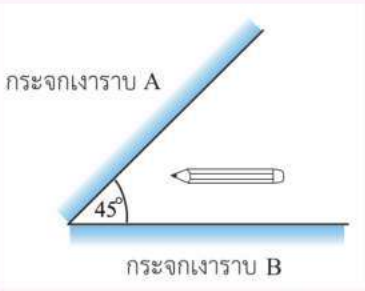
รูป ประกอบปัญหาข้อ 17

พิจารณาแสงจากวัตถุที่จุด A ไปตกกระทบกระจกโค้งเว้า P แล้วสะท้อนกลับไปที่กระจกโค้งเว้า Q จากนั้นสะท้อนกลับมาพบกันที่จุด B จะพบว่าจุด B อยู่ห่างจากกระจกโค้งเว้า P เป็นระยะเท่าใด

18. ถ้าวัตถุอยู่ห่างจากกระจกโค้งเว้า 36.4 เซนติเมตร จะเกิดภาพจริงที่มีความสูงเท่ากับวัตถุ กระจกโค้งเว้านี้มีรัศมีความโค้งเท่าใด
19. กระจกโค้งนูนมีความยาวโฟกัส 24 เซนติเมตร จงหากำลังขยายเมื่อ
    ก. ระยะวัตถุเท่ากับ 8 เซนติเมตร
    ข. ระยะวัตถุเท่ากับ 16 เซนติเมตร
20. ถ้าจะทำให้เกิดภาพหลังกระจกโค้งนูนและอยู่ห่างจากกระจกโค้งนูน 20 เซนติเมตร โดยที่กระจกโค้งนูนมีรัศมีความโค้ง 60 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งที่ต้องวางวัตถุ ด้วยวิธีดังนี้
    ก. การเขียนแผนภาพรังสีของแสง
    ข. การคำนวณ

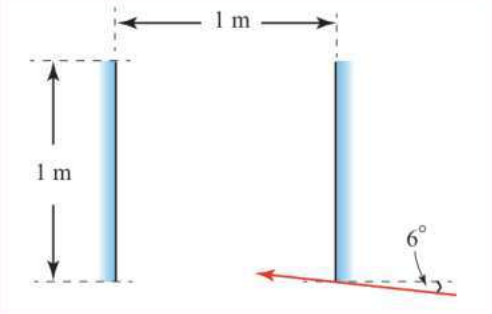
ปัญหาท้าทาย

21. วางวัตถุห่างจากกระจกเงานูนเป็นระยะครึ่งหนึ่งของความยาวโฟกัส ภาพที่เกิดขึ้นเป็นภาพชนิดใด และมีกำลังขยายเท่าใด
22. กระจกมองด้านข้างของรถยนต์เป็นกระจกโค้งนูนที่มีความยาวโฟกัส 6 เมตร ถ้ารถมอเตอร์ไซค์คันที่วิ่งตามหลังอยู่ห่างออกไป 10 เมตร จะเกิดภาพที่กระจกเป็นระยะทางเท่าใด และมีกำลังขยายเท่าใด
23. กระจกเงาราบสองบานหันหน้าเข้าหากันทำมุม 60 องศา รังสีของแสงตกกระทบต้องทำมุมเท่าไรกับกระจกบานแรก จึงจะทำให้รังสีของแสงที่สะท้อนจากกระจกบานที่สองขนานกับกระจกบานแรก
24. ดินสอแท่งหนึ่งวางไว้ระหว่างกระจกเงาราบ 2 บาน ที่ทำมุมกันเท่ากับ 45 องศา ดังรูป
    จงเขียนแผนภาพรังสีของแสงเพื่อแสดงภาพที่เกิดจากกระจกเงาราบทั้งสอง โดยพิจารณาแสงจากดินสอที่กระทบกระจกเงาราบ A แล้วสะท้อนไปยังกระจกเงาราบ B



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 24

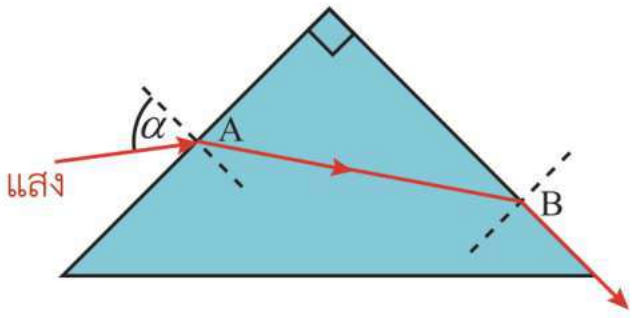
25. กระจกเงาราบ 2 บานมีความสูง 1 เมตรเท่ากัน แขวนห้อยหันหน้าเข้ากันให้ขนานกันและห่างกัน 1 เมตร ถ้าฉายลำแสงเลเซอร์ทำมุม 6 องศากับแนวด้านล่างของขอบกระจก ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 25

แสงกระทบกระจกแต่ละบานได้กี่ครั้ง (กำหนดให้ $\tan 6^\circ = 0.10$)

26. รังสีของแสงที่เคลื่อนที่จากอากาศเข้าสู่น้ำแข็งและน้ำโดยทำมุมตกกระทบเท่ากับ 50 องศา ผลต่างของมุมหักเหของแสงที่เกิดขึ้นในน้ำแข็งและน้ำเป็นเท่าใด ถ้าดรรชนีหักเหของน้ำแข็งและน้ำเท่ากับ 1.309 และ 1.333 ตามลำดับ
27. เทคาร์บอนไดซัลไฟต์ซึ่งเป็นของเหลวใสที่มีดรรชนีหักเห 1.63 ลงไปในอ่างแก้วใบใหญ่ที่สูง 10 เซนติเมตร จนเต็มอ่าง โดยที่ก้นอ่างมีหลอดไฟขนาดเล็กดวงหนึ่งเปิดสว่างอยู่ จงหาพื้นที่ผิวที่มากที่สุดของคาร์บอนไดซัลไฟต์ที่แสงลอดผ่านขึ้นมาได้
28. แสงทำมุมตกกระทบบนด้านของปริซึมสามเหลี่ยมมุมฉากที่ A แล้วหักเหเข้าไปในปริซึม จากนั้นแสงกระทบผิวปริซึมที่ B แล้วหักเหเป็นมุม 90 องศา ดังรูป



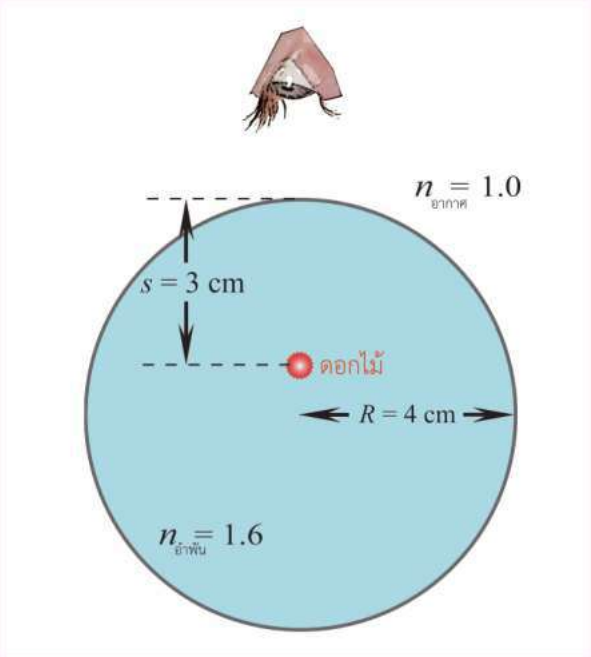
รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 28

จงหา

ก. ดรรชนีหักเหของปริซึมในเทอมของ α มีค่าเท่าใด

ข. ถ้ามุมตกกระทบ α มีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จะเกิดอะไรขึ้นหลังจากแสงกระทบผิวปริซึมที่ B

29. ที่ทับกระดาษรูปทรงกลมรัศมี 4.0 เซนติเมตร ทำด้วยอำพันซึ่งมีดรรชนีหักเห 1.6 โดยมีดอกไม้ขนาดเล็กวางอยู่บนเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวดิ่ง และห่างจากผิวด้านบนของทรงกลม 3.0 เซนติเมตร เมื่อมองดูดอกไม้ตามแนวดิ่ง ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 29

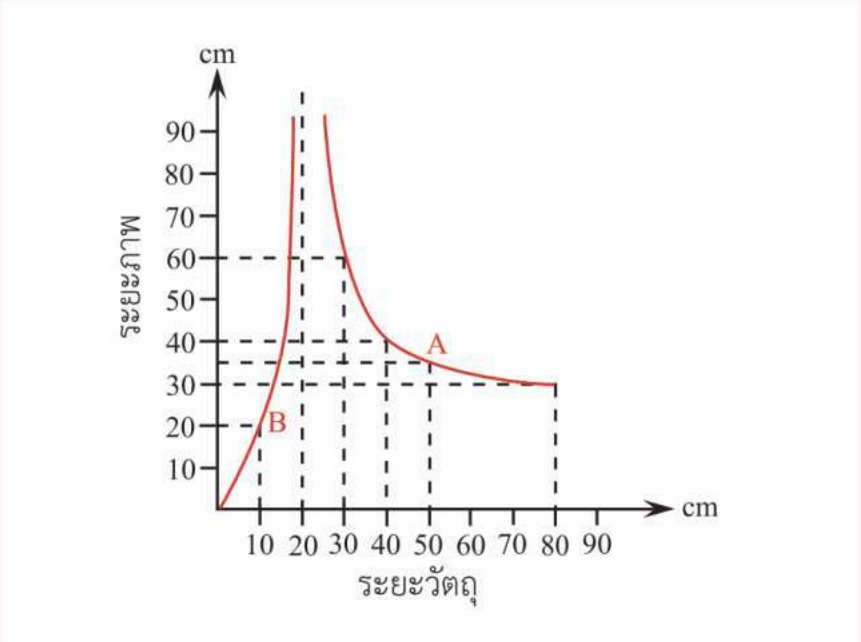
ภาพดอกไม้อยู่ลึกจากผิวทรงกลมด้านที่มองเท่าใด กำหนดดรรชนีหักเหของอากาศเป็น 1.0

30. ชายคนหนึ่งมองลงไปในสระน้ำในแนวดิ่งเพื่อหานาฬิกาที่ตกลงไปในสระน้ำ ปรากฏว่าเขาเห็นนาฬิกาอยู่ลึกจากผิวน้ำ h ถ้าสระน้ำลึก H และมีดรรชนีหักเห n จงแสดงว่า $h = \frac{H}{n}$

31. วัตถุตันทำจากวัสดุโปร่งใสทรงลูกบาศก์ ยาวด้านละ 20.0 เซนติเมตร ภายในมีเม็ดทรายเล็ก ๆ 1 เม็ด เมื่อมองด้านหนึ่งเห็นเม็ดทรายที่ระยะ 7.5 เซนติเมตร จากผิว แต่เมื่อมองด้านตรงข้ามจะเห็นที่ระยะ 5.0 เซนติเมตร จากผิวด้านตรงข้าม เม็ดทรายอยู่ที่ตำแหน่งใดจากผิวด้านแรกที่มอง และวัสดุโปร่งใสนี้มีดรรชนีหักเหเท่าใด

32. ภาชนะรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.0 เซนติเมตร เมื่อผู้สังเกตมองผ่านขอบด้านบนเห็นขอบของก้นภาชนะด้านตรงข้ามพอดี แต่เมื่อเติมน้ำจนเต็มภาชนะผู้สังเกตที่อยู่ที่ตำแหน่งเดิมจะเห็นจุดกึ่งกลางของก้นภาชนะพอดี ภาชนะใบนี้สูงเท่าไร ถ้าดรรชนีหักเหของน้ำเท่ากับ 1.333

33. นักเรียนวางวัตถุไว้หน้าเลนส์นูนที่ระยะต่าง ๆ แล้วบันทึกระยะวัตถุและระยะภาพที่สัมพันธ์กัน โดยนำมาเขียนกราฟ ได้ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 33

จงหา

ก. ความยาวโฟกัสของเลนส์นูน

ข. ระยะภาพเมื่อวางวัตถุที่ระยะ 40 เซนติเมตร จากเลนส์

ค. ระยะวัตถุและระยะภาพ ณ จุด A ในกราฟ

ง. ภาพ ณ จุด A ในกราฟ เป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน และมีขนาดขยายหรือย่อ

จ. จุดบนกราฟที่จะทำให้เกิดภาพจริงและมีขนาดขยายเป็น 2 เท่าของวัตถุ

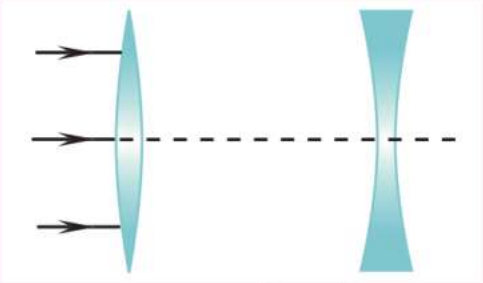
34. แมวตัวหนึ่งอยู่ที่ระยะ 10 เมตร หน้าเลนส์นูนที่มีความยาวโฟกัส 15 เซนติเมตร ถ้าแมวเดินออกจากเลนส์ไป 5 เมตร ภาพที่เกิดขึ้นเลื่อนไปจากเดิมเท่าไร และเลื่อนเข้าหาหรือออกจากเลนส์

35. วางวัตถุอยู่หน้าเลนส์นูนและห่างจากเลนส์นูน 1.00 เมตร ถ้าเลนส์นูนมีความยาวโฟกัส 0.50 เมตร และอยู่หน้ากระจกเงาราบ โดยเลนส์นูนและกระจกเงาราบอยู่ห่างกัน 2.00 เมตร เมื่อมองผ่านเลนส์นูนตรงไปที่กระจกเงาราบ จงหา

ก. ระยะภาพสุดท้ายเทียบกับเลนส์นูน

ข. ภาพสุดท้ายเป็นภาพจริงหรือภาพเสมือน

36. เลนส์นูนมีความยาวโฟกัส 0.20 เมตร และเลนส์เว้ามีความยาวโฟกัส 0.15 เมตร วางอยู่โดยมีเส้นแกนมุขสำคัญร่วมกัน เมื่อให้แสงขนานตกกระทบเลนส์นูน ดังรูป



รูป ประกอบปัญหาท้าทายข้อ 36

ถ้าต้องการให้แสงที่ผ่านเลนส์เว้าออกมาเป็นแสงขนานอีกครั้ง เลนส์ทั้งสองจะต้องอยู่ห่างกันเท่าใด

37. เลนส์นูนความยาวโฟกัส 24.0 เซนติเมตร อยู่ทางซ้ายของเลนส์เว้าที่มีความยาวโฟกัส 28.0 เซนติเมตร โดยเลนส์ทั้งสองวางห่างกัน 56.0 เซนติเมตร และมีเส้นแกนมุขสำคัญร่วมกัน ถ้าวางวัตถุทางซ้ายของเลนส์นูนและห่างจากเลนส์นูน 12 เซนติเมตร จงหาตำแหน่งของภาพสุดท้ายเทียบกับเลนส์เว้า
38. เลนส์เว้าความยาวโฟกัส 9.0 เซนติเมตร ที่มีลักษณะเหมือนกันสองอันวางห่างกัน 16.0 เซนติเมตร และมีเส้นแกนมุขสำคัญร่วมกัน ถ้าวางวัตถุทางซ้ายห่างจากเลนส์ที่อยู่ทางซ้ายเท่ากับ 4.0 เซนติเมตร จงหาระยะภาพสุดท้ายเทียบกับเลนส์ที่อยู่ทางขวา
39. เลนส์เว้าความยาวโฟกัส 10.0 เซนติเมตร อยู่ทางซ้ายของเลนส์นูนความยาวโฟกัส 30.0 เซนติเมตร เป็นระยะ 20.0 เซนติเมตร ถ้าวางวัตถุสูง 3.0 เซนติเมตรอยู่ทางซ้ายของเลนส์เว้าที่โฟกัสพอดี จงหาระยะภาพสุดท้ายเทียบกับเลนส์นูน และความสูงของภาพสุดท้าย
40. วัตถุหนึ่งอยู่หน้ากระจกโค้งนูน 25 เซนติเมตร เกิดภาพหลังกระจก 20 เซนติเมตร ถ้าวัตถุอยู่ที่ 18 เซนติเมตร จะเกิดภาพที่ใด
41. วางวัตถุไว้หน้ากระจกโค้งเว้าที่มีความยาวโฟกัสเท่ากับ 10.0 เซนติเมตร ทำให้เกิดภาพจริงขนาดขยาย 4 เท่า วัตถุนี้อยู่ห่างจากกระจกเป็นระยะเท่าใด
42. ชายคนหนึ่งยืนริมฝั่งแม่น้ำ และฝั่งตรงข้ามมีต้นไม้ต้นหนึ่ง เขาใช้กระจกบานหนึ่งหาความสูงของต้นไม้ และระยะทางระหว่างต้นไม้กับตัวเขา พบว่า กระจกเงาทำให้เกิดภาพของดวงอาทิตย์ที่ระยะ 0.80 เมตรจากหน้ากระจก เกิดภาพของต้นไม้ที่มีความสูง 0.10 เมตร และอยู่ที่ 0.81 เมตร จากหน้ากระจก จงหา

ก. กระจกเงาที่ใช้เป็นกระจกโค้งเว้าหรือกระจกโค้งนูน

ข. ต้นไม้อยู่ห่างจากชายคนนั้นประมาณเท่าใด

ค. ต้นไม้สูงประมาณเท่าใด

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก คณิตศาสตร์สำหรับฟิสิกส์

1. พื้นฐานทั่วไปทางคณิตศาสตร์

1.1 เศษส่วน ทศนิยม ร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์

1.2 อัตราส่วน อัตรา สัดส่วน

1.3 การแปรผันและสมการ

2. พีชคณิต

2.1 เลขชี้กำลัง

2.2 การแก้สมการ

2.3 สมการกำลังสอง

2.4 สมการเชิงเส้น

3. เรขาคณิตและตรีโกณมิติ

3.1 การหาความยาวระหว่างจุดสองจุดในระบบพิกัดฉาก

3.2 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

3.3 ทฤษฎีบทพีทาโกรัส

3.4 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

1. พื้นฐานทั่วไปทางคณิตศาสตร์

1.1 เศษส่วน ทศนิยม ร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์

เศษส่วน (fraction) ในทางเลขคณิต หมายถึง จำนวนที่อยู่ในรูป $\frac{A}{B}$ โดยที่ $B \neq 0$ เรียก A ว่า ตัวเศษ เรียก B ว่า ตัวส่วน เช่น $\frac{2}{5}$, $\frac{1+\sqrt{2}}{2-\sqrt{3}}$ ในทางพีชคณิต ตัวเศษและตัวส่วนอาจเป็นตัวแปรหรือตัวไม่รู้ค่า (unknown) เช่น $\frac{x}{2}$, $\frac{1}{f}$ เราอาจแสดงเศษส่วนในรูปทศนิยม (decimal) โดยหารตัวเศษด้วยตัวส่วน หรือแสดงในรูปร้อยละหรือเปอร์เซ็นต์ (percent) โดยการคูณด้วย 100% เช่น $\frac{1}{4}$ ในรูปทศนิยมเขียนได้ดังนี้ $\frac{1}{4} = 0.25$ และในรูปเปอร์เซ็นต์ เขียนได้ดังนี้ $0.25 \times 100\% = 25\ \%$

1.2 อัตราส่วน อัตรา สัดส่วน

อัตราส่วน (ratio) เป็นการเปรียบเทียบปริมาณสองปริมาณโดยการหาร ซึ่งจะเขียนเหมือนเศษส่วน

อัตรา (rate) เป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณสองปริมาณที่มีหน่วยต่างกัน เช่น $\frac{\text{ระยะทาง}}{\text{เวลา}}$ โดยที่ระยะทางมีหน่วย เมตร (m) และเวลามีหน่วย วินาที (s) ในฟิสิกส์ ปริมาณที่เป็นตัวส่วน มักเป็น เวลา

สัดส่วน (proportion) เป็นสมการหรือข้อความที่แสดงการเท่ากันของอัตราส่วนสองอัตราส่วน เช่น $\frac{3}{6} = \frac{1}{2}$ บางสัดส่วนอาจมีตัวไม่รู้ค่า เช่น $\frac{4}{x} = \frac{2}{3}$, $\frac{x}{y} = \frac{a}{b}$

1.3 การแปรผันและสมการ

ในการค้นหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์ จะพบว่าเมื่อปริมาณหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลถึงปริมาณอื่น ปัญหาสำคัญประการหนึ่ง ก็คือ การหาว่าปริมาณต่าง ๆ เหล่านั้นมีความสัมพันธ์กันอย่างไร

นักวิทยาศาสตร์พบว่า เมื่อให้ความต่างศักย์ระหว่างปลายของลวดตัวนำ จะเกิดกระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำนั้น ถ้าเพิ่มความต่างศักย์เป็นสองเท่า กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำจะเป็นสองเท่า และถ้าเพิ่มความต่างศักย์เป็นสามเท่า กระแสไฟฟ้าในลวดตัวนำก็จะเป็นสามเท่า จึงกล่าวได้ว่า กระแสไฟฟ้าแปรผันกับความต่างศักย์ เขียนในรูปสัญลักษณ์ ได้ดังนี้ $I \propto V$ โดย I คือกระแสไฟฟ้า V คือความต่างศักย์ และ $\propto$ มีความหมายว่า “แปรผันกับ (is proportional to)”

การที่ปริมาณสองปริมาณมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่ม ทำให้อีกปริมาณหนึ่งเพิ่มขึ้นอย่างได้สัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันตรง (direct proportion)

บางครั้ง ปริมาณสองปริมาณอาจมีความสัมพันธ์ในลักษณะที่เมื่อปริมาณหนึ่งเพิ่ม ทำให้อีกปริมาณหนึ่งลดลงอย่างได้สัดส่วนกัน เรียกว่า การแปรผันกลับ (inverse proportion) เช่น นักวิทยาศาสตร์พบว่าเมื่อเพิ่มความดันให้แก๊สจำนวนหนึ่ง แก๊สจะมีปริมาตรลดลง ถ้าเพิ่มความดันเป็นสองเท่า ปริมาตรลดลงเหลือ $\frac{1}{2}$ และถ้าเพิ่มความดันเป็นสามเท่า ปริมาตรลดลงเหลือ $\frac{1}{3}$ จึงกล่าวได้ว่า ความดันของแก๊สแปรผันกับส่วนกลับของปริมาตร เขียนในรูปสัญลักษณ์ ได้ดังนี้ $P \propto \frac{1}{V}$ โดย P คือความดัน V คือปริมาตร และ $\propto$ มีความหมายว่า “แปรผันกับ” ซึ่งในกรณีนี้ กล่าวได้ว่า P แปรผันกับ $\frac{1}{V}$ หรือ P แปรผันกลับกับ V

ขั้นตอนต่อไปคือเปลี่ยน การแปรผัน (proportionality) เป็นสมการ (equation) (หรือเปลี่ยน $\propto$ เป็น =) ซึ่งทำได้โดยการใส่ ค่าคงตัวการแปรผัน (proportionality constant) k ดังนี้

จาก $I \propto V$ จะได้ $I = kV$ (1)

และ $P \propto \frac{1}{V}$ จะได้ $P = \frac{k}{V}$ (2)

นอกจากนี้ยังมีการแปรผันอื่น เช่น $T \propto \sqrt{l}$, $F \propto \frac{1}{r^2}$, $F \propto a$, $W \propto g$ ซึ่งจะทราบเกี่ยวกับความสัมพันธ์ (1) (2) และอื่น ๆ เมื่อศึกษาในรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์

การหาความสัมพันธ์ของปริมาณในรูปแบบของสมการ จะทำให้เราสามารถเชื่อมโยงความสัมพันธ์ของปริมาณทั้งสองในเชิงปริมาณ (quantitative) หรือเชิงตัวเลขได้ ซึ่งนำไปสู่การทำนายการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของปรากฏการณ์ต่าง ๆ ได้

2. พีชคณิต

2.1 เลขชี้กำลัง

เลขชี้กำลัง (exponent) หมายถึง ตัวเลขหรือสัญลักษณ์ที่เขียนไว้ด้านบนขวาของจำนวนหรือนิพจน์ใด ๆ เช่น $5^3, 9^{\frac{1}{2}}, 4^a$ และ $(x+1)^2$ มี 3 , $\frac{1}{2}$, a และ 2 เป็นเลขชี้กำลัง ตามลำดับ ส่วนจำนวนหรือนิพจน์ 5, 9, 4 และ $x+1$ เรียกว่า ฐานเลขชี้กำลังจะบอกให้ทราบว่า จะต้องคูณจำนวนหรือนิพจน์ (ฐาน) กี่ครั้ง เช่น a^3 หมายถึง $a \times a \times a$ หรือ $a \cdot a \cdot a$

สมบัติของเลขชี้กำลัง

สำหรับ a ไม่เท่ากับศูนย์ และ p เป็นจำนวนเต็มใด ๆ จะได้

$$a^0 = 1,\ a^1 = a,\ \frac{1}{a^p} = a^{-p}$$

สำหรับ a และ b เป็นจำนวนเต็มและไม่เท่ากับศูนย์ r , s และ t เป็นจำนวนเต็ม จะได้

$$a^r a^s = a^{r+s}, (a^r)^s = a^{rs},\ \frac{a^r}{a^s} = a^{r-s},\ (ab)^r = a^r b^r,\ (a^r b^s)^t = a^{rt} b^{st}$$

2.2 การแก้สมการ

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณต่าง ๆ ในฟิสิกส์ มักอยู่ในรูปสมการที่มีสัญลักษณ์แทนปริมาณเหล่านั้น และมีเครื่องหมาย = ซึ่งบอกให้ทราบว่าปริมาณทั้งหลายที่อยู่ข้างซ้ายและข้างขวาของ = มีค่าเท่ากัน เช่น $\rho = \frac{m}{V}$, $v = \frac{s}{t}$, $v^2 = u^2 + 2as$, $v = 2\pi rf$, $F = ma$ และ $E = mc^2$ ในวิชาพีชคณิตนิยมใช้สัญลักษณ์ x y และ z แทนปริมาณที่ไม่ทราบค่าหรือ**ตัวไม่รู้ค่า** (unknown) เราต้องแก้สมการเพื่อหาค่าของปริมาณหรือตัวไม่รู้ค่านั้น

การแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว

ในการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว เช่น $2x + 5 = 8$ ให้จัดกระทำกับสมการโดยอาศัยหลักการ ได้แก่ (1) การบวกหรือลบด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ (2) การคูณหรือหารด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ และ (3) การยกกำลังหรือใส่รากด้วยตัวเลขหรือสัญลักษณ์ **การจัดกระทำดังกล่าวต้องทำทั้งสองข้างของสมการเพื่อให้ทั้งสองข้างของสมการยังคงเท่ากัน**จนกระทั่งได้ ตัวไม่รู้ค่า อยู่ข้างซ้ายของ = ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง จงหา x จากสมการ ก. $x+6 = 2$ ข. $4x = 12$ ค. $\frac{x}{2} = 5$

วิธีทำ ก. ลบทั้งสองข้างด้วย 6 $x+6-6 = 2-6$

$$x = -4$$

ข. หารทั้งสองข้างด้วย 4 $\frac{4x}{4} = \frac{12}{4}$

$$x = 3$$

ค. คูณทั้งสองข้างด้วย 2 $\frac{x}{2}\times 2 = 5\times 2$

$$x = 10$$

การแก้สมการ (กำลังหนึ่ง) ที่มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัว

ในการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว ต้องการเพียง 1 สมการ แต่การแก้สมการ (กำลังหนึ่ง) ที่มีตัวไม่รู้ค่า 2 ตัว ต้องใช้ 2 สมการ โดยมีขั้นตอนดังนี้ (1) เลือกสมการใดสมการหนึ่ง แล้วหา x ในเทอมของ y (หรือหา y ในเทอมของ x) (2) นำ x ไปแทนในอีกสมการหนึ่ง จะได้ค่าของ y (3) นำค่าของ y ไปแทนในอีกสมการหนึ่ง จะได้ค่าของ x ในการจัดกระทำกับขั้นตอนแต่ละขั้น ใช้หลักการเดียวกับการแก้สมการที่มีตัวไม่รู้ค่า 1 ตัว ดังตัวอย่าง

[หมายเหตุ การแก้สมการในตัวอย่างต่อไปนี้ เป็นวิธีการหนึ่ง ยังมีวิธีการอื่น ซึ่งให้ผลเหมือนกัน]

ตัวอย่าง จงหา x และ y ในสมการ ก. $x-2y=4$ และ สมการ ข. $3x+y=5$

วิธีทำ ขั้นที่ (1) เลือกสมการ ก. เพื่อหา x ในเทอมของ y [หรือเลือกสมการ ข. เพื่อหา y ในเทอมของ x ก็ได้]

$$x-2y = 4$$

$$x = 4+2y \qquad \text{[บวกทั้งสองข้างด้วย 2y]}$$

ขั้นที่ (2) นำ $x = 4+2y$ ไปแทนในสมการ ข. จะได้

$$3(4+2y)+y = 5$$

$$12+6y+y = 5$$

$$12+7y = 5$$

$$7y = -7 \qquad \text{[ลบทั้งสองข้างด้วย 12]}$$

$$y = -1 \qquad \text{[หารทั้งสองข้างด้วย 7]}$$

ขั้นที่ (3) $y=-1$ นำ ไปแทนในสมการ $x=2y+4$ จะได้ $x = 2(-1)+4 = 2$

คำตอบ $x=2$ และ $y=-1$

การตรวจคำตอบ โดยการนำคำตอบที่หาได้ไปแทนในสมการทั้งสองในโจทย์ ดังนี้

จากสมการ ก. $x-2y = 4$

$2-2(-1) = 4$ [แทน $x=2$ และ $y=-1$]

$2+2 = 4$

$4 = 4$ [สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน]

และสมการ ข. $3x+y = 5$

$3(2)+(-1) = 5$ [แทน $x=2$ และ $y=-1$]

$6-1 = 5$

$5 = 5$ [สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน]

จะเห็นว่า สองข้างของ = มีค่าเท่ากัน แสดงว่า $x=2$ และ $y=-1$ ถูกต้อง

2.3 สมการกำลังสอง

สมการกำลังสอง (quadratic equation) อยู่ในรูป $ax^2+bx+c=0$ เมื่อ x เป็นตัวไม่รู้ค่า a, b และ c เป็นตัวคงค่า โดยที่ $a \neq 0$

รากของสมการกำลังสองคือ $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$ ถ้า $b^2-4ac \geq 0$ รากจะเป็นจำนวนจริง 2 ค่า

ตัวอย่าง จงหา x จากสมการ $x^2+3x+2 = 0$

วิธีทำ รากของสมการคือ $x = \dfrac{-b \pm \sqrt{b^2-4ac}}{2a}$

$$x = \frac{-3 \pm \sqrt{3^2-4(1)(2)}}{2(1)} = \frac{-3 \pm \sqrt{1}}{2} = \frac{-3 \pm 1}{2}$$

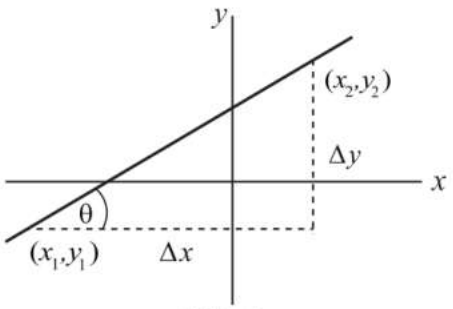
$x = \dfrac{-3+1}{2} = -1$ และ $x = \dfrac{-3-1}{2} = -2$

$x = -1, -2$

ตอบ x เท่ากับ -1 หรือ -2

2.4 สมการเชิงเส้น

สมการเชิงเส้น (linear equation) หรือสมการเส้นตรง มีรูปแบบดังนี้ $y = mx + b$ โดยที่ m และ b เป็นตัวคงค่า สมการนี้เป็นเชิงเส้นเพราะเมื่อเขียนกราฟของ y และ x จะได้กราฟเป็นเส้นตรง ดังรูป ก. 1



รูป ก. 1

ตัวคงค่า b เรียกว่า ระยะตัดแกน y (y-intercept) เป็นค่าของ y ที่เส้นตรงตัดกับแกน y

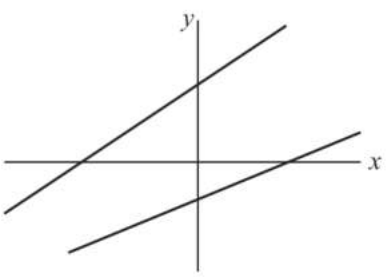
ตัวคงค่า m เท่ากับ ความชัน (slope, gradient) ของเส้นตรง และเท่ากับ tan ของมุมที่เส้นตรงทำกับแกน x (ในกรณีแกนทั้งสองใช้สเกลเดียวกัน)

ถ้า (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) เป็นจุดสองจุดบนเส้นตรง ดังรูป ก. 1 ความชันของเส้นตรงมีค่าดังนี้

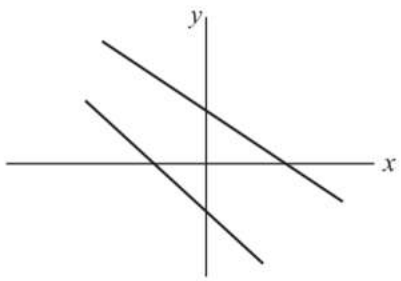
$$\text{ความชัน} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \tan\theta$$

ถ้า $m > 0$ เส้นตรงมีความชันเป็นบวก ดังรูป ก. 2 ถ้า $m < 0$ เส้นตรงมีความชันเป็นลบ ดังรูป ก. 3

สังเกตว่า m และ b มีค่าได้ทั้งบวกและลบ



รูป ก. 2 $m > 0$

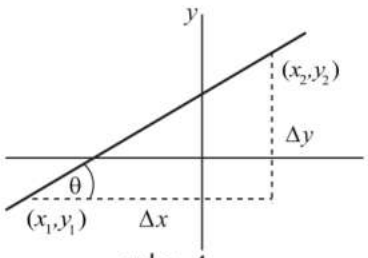


รูป ก. 3 $m < 0$

3. เรขาคณิตและตรีโกณมิติ

3.1 การหาความยาวระหว่างจุดสองจุดในระบบพิกัดฉาก

ความยาวระหว่างจุดสองจุดที่มีพิกัด (x_1, y_1) และ (x_2, y_2) หาได้จาก $s = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$



รูป ก. 4

3.2 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

ข้อมูลเกี่ยวกับรูปทรงทางเรขาคณิต ได้แก่ เส้นรอบรูป พื้นที่ พื้นที่ผิวและปริมาตร แสดงในตาราง ก. 1

ตาราง ก. 1 ข้อมูลรูปทรงทางเรขาคณิต

รูปทรง	เส้นรอบรูป	พื้นที่	พื้นที่ผิว	ปริมาตร
วงกลม รัศมี r	$2\pi r$	πr^2		
จัตุรัส ความยาวด้าน a	$4a$	a^2		
สี่เหลี่ยมผืนผ้า ยาว l กว้าง w	$2l + 2w$	lw		
สามเหลี่ยม ฐาน a สูง h		$\frac{1}{2}ah$		
ทรงกระบอก รัศมี r สูง h			$2\pi rh + 2\pi r^2$	$\pi r^2 h$
ทรงกลม รัศมี r			$4\pi r^2$	$\frac{4}{3}\pi r^3$
ลูกบาศก์ ความยาวด้าน a			$6a^2$	a^3

3.3 ทฤษฎีบทพีทาโกรัส

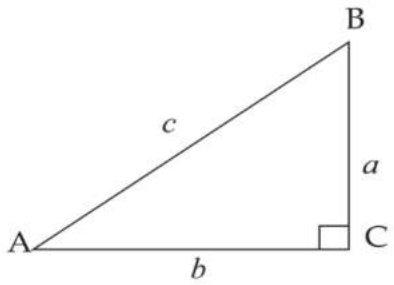
ทฤษฎีบทพีทาโกรัส (Pythagoras' theorem) เป็นทฤษฎีบทที่เกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างด้านทั้งสามของสามเหลี่ยมมุมฉาก กล่าวว่า ในสามเหลี่ยมมุมฉากใด ๆ ผลรวมของพื้นที่จัตุรัสบนด้านประกอบมุมฉากเท่ากับพื้นที่ของจัตุรัสบนด้านตรงข้ามมุมฉาก

ถ้า a และ b แทนความยาวของด้านประกอบมุมฉาก

และ c แทนความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก ดังรูป ก. 5

จะเขียนทฤษฎีบทพีทาโกรัส ในรูปสมการได้ดังนี้

$$c^2 = a^2 + b^2 \quad \text{หรือ} \quad c = \sqrt{a^2 + b^2}$$



รูป ก. 5

ตัวอย่าง จงหาความยาว c ของด้าน AB ของสามเหลี่ยมมุมฉาก ABC ในรูป ก. 5 เมื่อ $a = 3$ cm และ $b = 4$ cm

วิธีทำ ความยาวของด้าน $AC = b = 4$ cm

ความยาวของด้าน $BC = a = 3$ cm

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$= \sqrt{(3\,\text{cm})^2 + (4\,\text{cm})^2} = \sqrt{9\,\text{cm}^2 + 16\,\text{cm}^2} = \sqrt{25\,\text{cm}^2}$$

$$= 5 \text{ cm}$$

ตอบ c มีค่าความยาวเท่ากับ 5 เซนติเมตร

3.4 ฟังก์ชันตรีโกณมิติ

ฟังก์ชันตรีโกณมิติเป็นอัตราส่วนระหว่างความยาวของด้านสองด้านของสามเหลี่ยมมุมฉาก ฟังก์ชันตรีโกณมิติ ได้แก่ sine (sin), cosine (cos), tangent (tan), cosecant (csc), secant (sec) และ cotangent (cot) แต่ฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ใช้บ่อย ได้แก่ sin cos และ tan

พิจารณา สามเหลี่ยมมุมฉาก ABC มี C เป็นมุมฉาก

a เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุม θ

b เป็นความยาวของด้านประชิดมุม θ

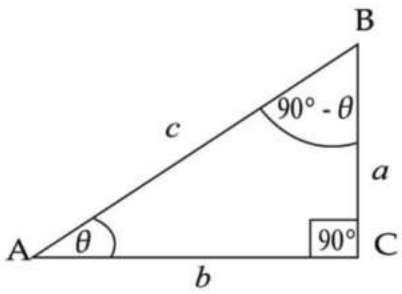
c เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุมฉาก

ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุม θ ถูกกำหนดดังนี้

$$\sin\theta = \frac{a}{c} \qquad \csc\theta = \frac{c}{a} = \frac{1}{\sin\theta}$$

$$\cos\theta = \frac{b}{c} \qquad \sec\theta = \frac{c}{b} = \frac{1}{\cos\theta}$$

$$\tan\theta = \frac{a}{b} \qquad \cot\theta = \frac{b}{a} = \frac{1}{\tan\theta}$$



รูป ก. 6

จากสามเหลี่ยมมุมฉาก ในรูป ก. 6 จะได้

$\sin\theta = \cos(90^\circ - \theta)$, $\cos\theta = \sin(90^\circ - \theta)$, $\tan\theta = \cot(90^\circ - \theta)$, $\tan\theta = \dfrac{\sin\theta}{\cos\theta}$

จากทฤษฎีบทพีทาโกรัส $c^2 = a^2 + b^2$ สามารถพิสูจน์ได้ว่า

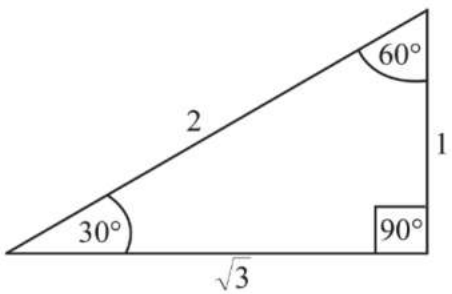
$\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$, $\sec^2\theta - \tan^2\theta = 1$, $\csc^2\theta - \cot^2\theta = 1$

ความสัมพันธ์อื่น ๆ ของฟังก์ชันตรีโกณมิติ

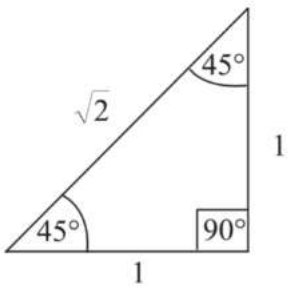
$\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$	$\sin(A \pm B) = \sin A\cos B \pm \cos A\sin B$
$\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$	$\cos(A \pm B) = \cos A\cos B \mp \sin A\sin B$
$\tan 2\theta = \dfrac{2\tan\theta}{1-\tan^2\theta}$	$\tan(A \pm B) = \dfrac{\tan A \pm \tan B}{1 \mp \tan A\tan B}$

ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมที่พบบ่อย

สามเหลี่ยมมุมฉากที่พบบ่อยคือสามเหลี่ยมมุมฉากที่มีมุม 30° -60° -90° และ 45° -45° -90° สามเหลี่ยมทั้งสองมีความยาวของด้านทั้งสามดังรูป ก. 7 และ ก. 8 ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ มีค่าดังตาราง ก. 2 [ถ้าจำได้ จะช่วยแก้ปัญหาทางฟิสิกส์ได้เร็วขึ้น]

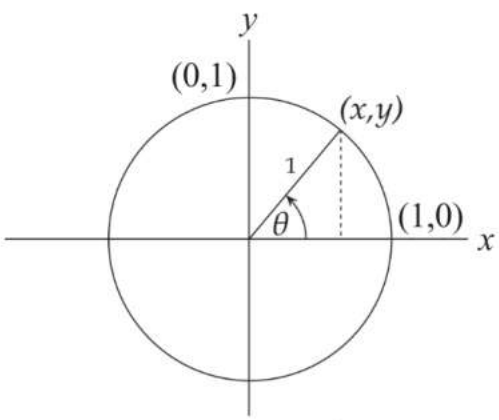


รูป ก. 7 สามเหลี่ยมมุมฉาก 30°-60°-90°



รูป ก. 8 สามเหลี่ยมมุมฉาก 45°-45°-90°

ส่วนฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมอื่น ๆ ที่พบบ่อย เช่น 90°, 120°, 180° หาได้จากค่าของ x, y บนส่วนโค้งของวงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย ดังรูป ก. 9 โดย $\sin\theta = y$, $\cos\theta = x$ และ $\tan\theta = \dfrac{y}{x}$ เช่น ที่ $\theta = 90^\circ$ $x = 0, y = 1$ ได้ $\sin 90^\circ = 1$, $\cos 90^\circ = 0$ และ $\tan 90^\circ = \infty$



รูป ก. 9 วงกลมรัศมีหนึ่งหน่วย

ตาราง ก. 2 ฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมที่พบบ่อย

ฟังก์ชันตรีโกณมิติ	มุม								
	0°	30°	45°	60°	90°	120°	180°	270°	360°
sin	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	0	-1	0
cos	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{2}$	0	$-\frac{1}{2}$	-1	0	1
tan	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1	$\sqrt{3}$	∞	$-\sqrt{3}$	0	∞	0

การใช้งานฟังก์ชันตรีโกณมิติในฟิสิกส์ระดับนี้ อาจแบ่งได้ 3 กรณี

1. การหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่มีมุมไม่ตรงกับมุมในตาราง ก. 2 ซึ่งสามารถหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุมต่าง ๆ ได้จาก ภาคผนวก ค ตารางฟังชันตรีโกณมิติ เช่น $\sin 23^\circ, \cos 47^\circ, \tan 62^\circ$ จะได้ $\sin 23^\circ = 0.3907, \cos 47^\circ = 0.6820, \tan 62^\circ = 1.8807$ ตามลำดับ

2. การหามุมของฟังก์ชันตรีโกณมิติ เช่น การหา ϕ ของ $\tan\phi = 1.3519$ สามารถหาค่าได้จากภาคผนวก ค ตารางฟังชันตรีโกณมิติ จะได้ $\phi = 53.5^\circ$

3. การหามุมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่อยู่ในเทอมของตัวแปร เช่น $\sin\theta = \frac{a}{\omega^2 L}$ อาจแสดงค่าของมุมได้ 2 แบบ ดังนี้ $\theta = \sin^{-1}\left(\frac{a}{\omega^2 L}\right)$ หรือ $\theta = \arcsin\left(\frac{a}{\omega^2 L}\right)$

ความสัมพันธ์ระหว่างด้านและมุมภายในของสามเหลี่ยมใด ๆ

สมมติสามเหลี่ยมใด ๆ มี α, β และ γ เป็นมุมภายใน และมี a, b และ c เป็นความยาวของด้านตรงข้ามมุม α, β และ γ ตามลำดับ ดังรูป ก. 10 ด้านและมุมภายในของสามเหลี่ยมมีความสัมพันธ์กันดังนี้

กฎของไซน์ (law of sines)

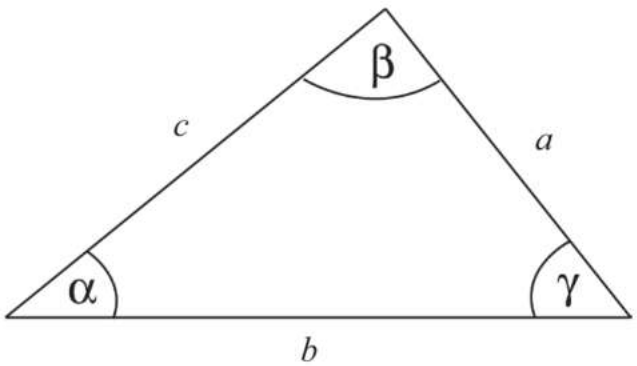
$$\frac{a}{\sin\alpha} = \frac{b}{\sin\beta} = \frac{c}{\sin\gamma}$$

กฎของโคไซน์ (law of cosines)

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\cos\alpha$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac\cos\beta$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\gamma$$



รูป ก. 10

ภาคผนวก ข ระบบหน่วยระหว่างชาติ

ระบบหน่วยระหว่างชาติ (The International System of Units **หรือ** Le Système international d'unités) หรือเอสไอ ประกอบด้วย หน่วยฐาน หน่วยอนุพัทธ์ และคำนำหน้าหน่วย ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. หน่วยฐาน (base units) เป็นหน่วยหลักของเอสไอ มีทั้งหมด 7 หน่วย ดังตาราง ข. 1

ตาราง ข. 1 ชื่อและสัญลักษณ์ของของหน่วยฐาน

หน่วยฐาน	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ปริมาณฐาน
meter	เมตร	m	ความยาว
kilogram	กิโลกรัม	kg	มวล
second	วินาที	s	เวลา
ampere	แอมแปร์	A	กระแสไฟฟ้า
kelvin	เคลวิน	K	อุณหภูมิอุณพลวัติ
mole	โมล	mol	ปริมาณของสาร
candela	แคนเดลา	cd	ความเข้มของการส่องสว่าง

2. หน่วยอนุพัทธ์ (derived units)

หน่วยอนุพัทธ์เป็นหน่วยที่มีหน่วยฐานหลายหน่วยมาเกี่ยวเนื่องกัน หน่วยอนุพัทธ์มีหลายหน่วยซึ่งมีชื่อและสัญลักษณ์ที่กำหนดขึ้นโดยเฉพาะ ดังตาราง ข. 2

ตาราง ข. 2 ชื่อและสัญลักษณ์ของหน่วยอนุพัทธ์

ปริมาณอนุพัทธ์	หน่วยอนุพัทธ์				
	ชื่อหน่วย	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ในเทอมของเอสไออื่น	ในเทอมของหน่วยฐาน
ความถี่	เฮิรตซ์	hertz	Hz	-	s^{-1}
แรง	นิวตัน	newton	N	-	$m\ kg\ s^{-2}$
ความดัน	พาสคัล	pascal	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
พลังงาน งาน ปริมาณความร้อน	จูล	joule	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
กำลัง ฟลักซ์การแผ่รังสี	วัตต์	watt	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
ประจุไฟฟ้า ปริมาณไฟฟ้า	คูลอมบ์	coulomb	C	-	s A

ตาราง ข. 2 ชื่อและสัญลักษณ์ของหน่วยอนุพัทธ์ (ต่อ)

ปริมาณอนุพัทธ์	หน่วยอนุพัทธ์				
	ชื่อหน่วย	ศัพท์บัญญัติ	สัญลักษณ์	ในเทอมของเอสไออื่น	ในเทอมของหน่วยฐาน
ศักย์ไฟฟ้า ความต่างศักย์ อีเอ็มเอฟเหนี่ยวนำ	โวลต์	volt	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}A^{-1}$
ความจุ	ฟารัด	farad	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4A^2$
ความต้านทาน	โอห์ม	ohm	Ω	V/ A	$m^2\ kg\ s^{-3}A^{-2}$
ความนำ	ซีเมนส์	siemens	S	A/V	$m^{-2}kg^{-1}\ s^3\ A^2$
ฟลักซ์แม่เหล็ก	เวเบอร์	weber	Wb	V s	$m^2\ kg\ s^{-2}A^{-1}$
ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก	เทสลา	tesla	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}A^{-1}$
ความเหนี่ยวนำ	เฮนรี	henry	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}A^{-2}$
ฟลักซ์ส่องสว่าง	ลูเมน	lumen	lm	cd sr	cd
ความสว่าง	ลักซ์	lux	lx	lm/m^2	$m^{-2}cd$
กัมมันตภาพ	เบ็กเคอเรล	becquerel	Bq	-	s^{-1}
ขนาดกำหนดของกัมมันตภาพรังสี	ซีเวิร์ต	sievert	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
ขนาดกำหนดของการดูดกลืนของรังสีที่ทำให้แตกตัวเป็นไอออน	เกรย์	gray	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
มุมระนาบ	เรเดียน	radian	rad	-	m/m
มุมตัน	สตีเรเดียน	steradian	sr	-	m^2/m^2

3. คำนำหน้าหน่วย (prefixes)

เมื่อค่าในหน่วยฐานหรือหน่วยอนุพัทธ์มากหรือน้อยเกินไป เราสามารถเขียนค่านั้นเป็นตัวเลขคูณด้วยตัวคูณ (เลขสิบยกกำลังบวกหรือลบ) ได้ เช่น 0.000005 แอมแปร์ เขียนเป็น 5×10^{-6} แอมแปร์ หรือ 6000000 วัตต์ เขียนเป็น 6×10^6 วัตต์ ตัวคูณ 10^{-6} และ 10^6 ให้เขียนแทนด้วยคำนำหน้าหน่วย ไมโครและเมกะ กำกับไว้หน้าแอมแปร์และวัตต์ ตามลำดับ คำนำหน้าหน่วยที่ใช้แทนตัวคูณและสัญลักษณ์แสดงไว้ในตาราง 3

ตาราง ข. 3 คำนำหน้าหน่วยและสัญลักษณ์

ตัวคูณ	คำนำหน้าหน่วย		สัญลักษณ์
	ชื่อ	ศัพท์บัญญัติ	
10^{-24}	yocto	ยอคโต	y
10^{-21}	zepto	เซพโต	z
10^{-18}	atto	อัตโต	a
10^{-15}	femto	เฟมโต	f
10^{-12}	pico	พิโก	p
10^{-9}	nano	นาโน	n
10^{-6}	micro	ไมโคร	μ
10^{-3}	milli	มิลลิ	m
10^{-2}	centi	เซนติ	c
10^{-1}	deci	เดซิ	d

ตัวคูณ	คำนำหน้าหน่วย		สัญลักษณ์
	ชื่อ	ศัพท์บัญญัติ	
10^{1}	deca	เดคา	da
10^{2}	hecto	เฮกโต	h
10^{3}	kilo	กิโล	k
10^{6}	mega	เมกะ	M
10^{9}	giga	จิกะ	G
10^{12}	tera	เทระ	T
10^{15}	peta	เพตะ	P
10^{18}	exa	เอกซะ	E
10^{21}	zetta	เซตตะ	Z
10^{24}	yotta	ยอตตะ	Y

จากตัวอย่างข้างต้น

0.000005 แอมแปร์ = 5×10^{-6} แอมแปร์ = 5 ไมโครแอมแปร์ (μA)

6000000 วัตต์ = 6×10^{6} วัตต์ = 6 เมกะวัตต์ (MW)

หมายเหตุ

1. การใช้คำนำหน้าหน่วยควรใช้เพียงครั้งเดียว ไม่นิยมเขียนคำนำหน้าหน่วยซ้อนกัน เช่นไม่ควรเขียนมิลลิไมโครวินาที (mμs) ควรเขียนนาโนวินาที (ns)

2. การนำสัญลักษณ์ของคำนำหน้าหน่วยไปกำกับหน้าสัญลักษณ์ของหน่วย จะถือว่าได้สัญลักษณ์ใหม่เป็นสัญลักษณ์เดียว เมื่อนำไปยกกำลังไม่ต้องใส่วงเล็บ เช่น mm^3, μs^{-1}, GHz^{-1}

ภาคผนวก ค ตารางฟังก์ชันตรีโกณมิติ

มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent	มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent	มุม (องศา)	มุม (เรเดียน)	sine	cosine	tangent
0	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	31	0.5411	0.5150	0.8572	0.6009	61	1.0647	0.8746	0.4848	1.8040
1	0.0175	0.0175	0.9998	0.0175	32	0.5585	0.5299	0.8480	0.6249	62	1.0821	0.8829	0.4695	1.8807
2	0.0349	0.0349	0.9994	0.0349	33	0.5760	0.5446	0.8387	0.6494	63	1.0996	0.8910	0.4540	1.9626
3	0.0524	0.0524	0.9986	0.0524	34	0.5934	0.5592	0.8290	0.6745	64	1.1170	0.8988	0.4384	2.0503
4	0.0698	0.0697	0.9976	0.0699	35	0.6109	0.5736	0.8192	0.7002	65	1.1345	0.9063	0.4226	2.1445
5	0.0873	0.0872	0.9962	0.0875	36	0.6283	0.5878	0.8090	0.7265	66	1.1519	0.9135	0.4067	2.2460
6	0.1047	0.1045	0.9945	0.1051	37	0.6458	0.6018	0.7986	0.7536	67	1.1694	0.9205	0.3907	2.3559
7	0.1222	0.1219	0.9925	0.1228	38	0.6632	0.6157	0.7880	0.7813	68	1.1868	0.9272	0.3746	2.4751
8	0.1396	0.1391	0.9903	0.1405	39	0.6807	0.6293	0.7771	0.8098	69	1.2043	0.9336	0.3584	2.6051
9	0.1571	0.1565	0.9877	0.1584	40	0.6981	0.6428	0.7660	0.8391	70	1.2217	0.9397	0.3420	2.7475
10	0.1745	0.1736	0.9848	0.1763	41	0.7156	0.6561	0.7547	0.8693	71	1.2392	0.9455	0.3256	2.9042
11	0.1920	0.1908	0.9816	0.1944	42	0.7330	0.6691	0.7431	0.9004	72	1.2566	0.9511	0.3090	3.0777
12	0.2094	0.2079	0.9782	0.2126	43	0.7505	0.6820	0.7314	0.9325	73	1.2741	0.9563	0.2924	3.2709
13	0.2269	0.2250	0.9744	0.2309	44	0.7679	0.6947	0.7193	0.9657	74	1.2915	0.9613	0.2756	3.4874
14	0.2443	0.2419	0.9703	0.2493	45	0.7854	0.7071	0.7071	1.0000	75	1.3090	0.9659	0.2588	3.7321
15	0.2618	0.2588	0.9659	0.2679	46	0.8029	0.7193	0.6947	1.0724	76	1.3265	0.9703	0.2419	4.0108
16	0.2793	0.2756	0.9613	0.2867	47	0.8203	0.7314	0.6820	1.0724	77	1.3439	0.9744	0.2250	4.3315
17	0.2967	0.2924	0.9563	0.3057	48	0.8378	0.7431	0.6691	1.1106	78	1.3614	0.9781	0.2079	4.7046
18	0.3142	0.3090	0.9511	0.3249	49	0.8552	0.7547	0.6561	1.1504	79	1.3788	0.9816	0.1908	5.1446
19	0.3316	0.3256	0.9455	0.3443	50	0.8727	0.7660	0.6428	1.1918	80	1.3963	0.9848	0.1736	5.6713
20	0.3491	0.3421	0.9397	0.3640	51	0.8901	0.7771	0.6293	1.2349	81	1.4137	0.9877	0.1564	6.3138
21	0.3665	0.3584	0.9336	0.3839	52	0.9076	0.7880	0.6157	1.2799	82	1.4312	0.9903	0.1392	7.1154
22	0.3840	0.3746	0.9272	0.4040	53	0.9250	0.7986	0.6018	1.3270	83	1.4486	0.9925	0.1219	8.1443
23	0.4014	0.3907	0.9205	0.4245	54	0.9425	0.8090	0.5878	1.3764	84	1.4661	0.9945	0.1045	9.5144
24	0.4189	0.4067	0.9135	0.4452	55	0.9599	0.8192	0.5736	1.4281	85	1.4835	0.9962	0.0872	11.430
25	0.4363	0.4226	0.9063	0.4663	56	0.9774	0.8290	0.5592	1.4826	86	1.5010	0.9976	0.0698	14.301
26	0.4538	0.4384	0.8988	0.4877	57	0.9948	0.8387	0.5446	1.5399	87	1.5184	0.9986	0.0523	19.081
27	0.4712	0.4540	0.8910	0.5095	58	1.0123	0.8480	0.5299	1.6003	88	1.5359	0.9994	0.0349	28.636
28	0.4887	0.4695	0.8829	0.5317	59	1.0297	0.8572	0.5150	1.6643	89	1.5533	0.9998	0.0175	57.290
29	0.5061	0.4848	0.8746	0.5543	60	1.0472	0.8660	0.5000	1.7321	90	1.5708	1.0000	0.0000	∞
30	0.5236	0.5000	0.8660	0.5774	61	1.0647	0.8746	0.4848	1.8040					

ภาคผนวก ง ตารางเลขกำลังสอง รากที่สองและส่วนกลับ

n	n^2	$\sqrt{n}$	$10/n$
1	1	1.000	10.000
2	4	1.414	5.000
3	9	1.732	3.333
4	16	2.000	2.500
5	25	2.236	2.000
6	36	2.449	1.667
7	49	2.646	1.429
8	64	2.828	1.250
9	81	3.000	1.111
10	100	3.162	1.000
11	121	3.317	0.909
12	144	3.464	0.833
13	169	3.606	0.769
14	196	3.742	0.714
15	225	3.873	0.667
16	256	4.000	0.625
17	289	4.123	0.588
18	324	4.243	0.556
19	361	4.359	0.526
20	400	4.472	0.500
21	441	4.583	0.476
22	484	4.690	0.455
23	529	4.796	0.435
24	576	4.899	0.417
25	625	5.000	0.400
26	676	5.099	0.385
27	729	5.196	0.370
28	784	5.292	0.357
29	841	5.385	0.345
30	900	5.477	0.333
31	961	5.568	0.323
32	1024	5.657	0.313
33	1089	5.745	0.303
34	1156	5.831	0.294
35	1225	5.916	0.286
36	1296	6.000	0.278
37	1369	6.083	0.270
38	1444	6.164	0.263
39	1521	6.245	0.256
40	1600	6.325	0.25

n	n^2	$\sqrt{n}$	$10/n$
41	1681	6.403	0.244
42	1764	6.481	0.238
43	1849	6.557	0.233
44	1936	6.633	0.227
45	2025	6.708	0.222
46	2116	6.782	0.217
47	2209	6.856	0.213
48	2304	6.928	0.208
49	2401	7.000	0.204
50	2500	7.071	0.200
51	2601	7.141	0.196
52	2704	7.211	0.192
53	2809	7.280	0.189
54	2916	7.348	0.185
55	3025	7.416	0.182
56	3136	7.483	0.179
57	3249	7.550	0.175
58	3364	7.616	0.172
59	3481	7.681	0.169
60	3600	7.746	0.167
61	3721	7.810	0.164
62	3844	7.874	0.161
63	3969	7.937	0.159
64	4096	8.000	0.156
65	4225	8.062	0.154
66	4356	8.124	0.152
67	4489	8.185	0.149
68	4624	8.246	0.147
69	4761	8.307	0.145
70	4900	8.367	0.143
71	5041	8.426	0.141
72	5184	8.485	0.139
73	5329	8.544	0.137
74	5476	8.602	0.135
75	5625	8.660	0.133
76	5776	8.718	0.132
77	5929	8.775	0.130
78	6084	8.832	0.128
79	6241	8.888	0.127
80	6400	8.944	0.125

n	n^2	$\sqrt{n}$	$10/n$
81	6561	9.000	0.123
82	6724	9.055	0.122
83	6889	9.110	0.120
84	7056	9.165	0.119
85	7225	9.220	0.118
86	7396	9.274	0.116
87	7569	9.327	0.115
88	7744	9.381	0.114
89	7921	9.434	0.112
90	8100	9.487	0.111
91	8281	9.539	0.110
92	8464	9.592	0.109
93	8649	9.644	0.108
94	8836	9.695	0.106
95	9025	9.747	0.105
96	9216	9.798	0.104
97	9409	9.849	0.103
98	9604	9.899	0.102
99	9801	9.950	0.101
100	10000	10.000	0.100
101	10201	10.049	0.099
102	10404	10.100	0.098
103	10609	10.149	0.097
104	10816	10.198	0.096
105	11025	10.247	0.095
106	11236	10.296	0.094
107	11449	10.344	0.093
108	11664	10.392	0.093
109	11881	10.440	0.092
110	12100	10.488	0.091
111	12321	10.536	0.090
112	12544	10.583	0.089
113	12769	10.630	0.088
114	12996	10.677	0.088
115	13225	10.724	0.087
116	13456	10.770	0.086
117	13689	10.817	0.085
118	13924	10.863	0.085
119	14161	10.909	0.084
120	14400	10.954	0.083

ภาคผนวก จ ตัวอย่างการบันทึกการทดลอง

การศึกษาหาความรู้ทางวิทยาศาสตร์นั้นจำเป็นต้องมีการทดลอง เพื่อให้รู้จักและเข้าใจกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการหาเหตุผลหรือหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ การบันทึกรายละเอียดต่าง ๆ จากการสังเกตสิ่งที่เกิดขึ้นในการทดลองจึงเป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะการสรุปเหตุผลหรือการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจะใช้ข้อมูลที่ได้จากสังเกตเท่านั้นถ้าการบันทึกรายละเอียดในการทดลองมีความบกพร่อง เราอาจไม่สามารถสรุปได้ หรือต้องทำการทดลองซ้ำใหม่ ดังนั้น เราจะบันทึกผลการทดลองอย่างไร

การบันทึกการทดลอง ควรจัดลำดับของรายละเอียดต่าง ๆ ให้เหมาะสมและควรบันทึกด้วยข้อความที่กะทัดรัด เข้าใจง่ายและชัดเจน รายการที่บันทึกอาจเรียงลำดับดังนี้

1. หัวข้อการทดลอง
2. วัน เวลา สถานที่ทดลอง และสภาพแวดล้อมขณะนั้น
3. จุดประสงค์
4. วัสดุอุปกรณ์
5. วิธีทำกิจกรรม
6. ภาพการจัดอุปกรณ์การทดลอง
7. ตารางบันทึกผลการทดลอง
8. กราฟแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณที่วัดได้
9. การคำนวณจากตารางบันทึกผลการทดลองหรือจากกราฟ
10. การสรุปและอภิปรายผล หัวข้อนี้ควรประกอบด้วย การสรุป การแปลความหมาย การบอกความคลาดเคลื่อน (ในกรณีที่มีการหาความคลาดเคลื่อน) รวมทั้งข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงแก้ไขสำหรับการทดลองนี้ในครั้งต่อๆไป

เพื่อให้เกิดความเข้าใจในขั้นตอนการทำการทดลองข้างต้น ขอให้ศึกษาตัวอย่างการบันทึกการทดลองต่อไปนี้

กิจกรรม 5.3 การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

จุดประสงค์

1. เขียนและวิเคราะห์กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
2. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุล
3. อภิปรายเพื่อสรุปเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างงานของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับพลังงานศักย์ยืดหยุ่นของสปริง

วัสดุและอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งสปริง 1 เครื่อง
2. สปริง 1 อัน
3. ไม้บรรทัด 1 อัน
4. นอต 1 ตัว

วิธีทำกิจกรรม

1. ยึดนอตกับปลายสปริงด้านหนึ่งแล้วยึดปลายสปริงอีกด้านไว้กับดินสอ จากนั้นใช้ตะขอของเครื่องชั่งสปริงเกี่ยวนอตตัวเดียวกันไว้ แล้ววางสปริงและเครื่องชั่งสปริงให้อยู่ในแนวขนานกับไม้บรรทัด ให้ปลายสุดของสปริงด้านที่เกี่ยวกับเครื่องชั่งสปริงอยู่ตรงขีดศูนย์ของไม้บรรทัด ดังแสดงในรูปด้านล่าง

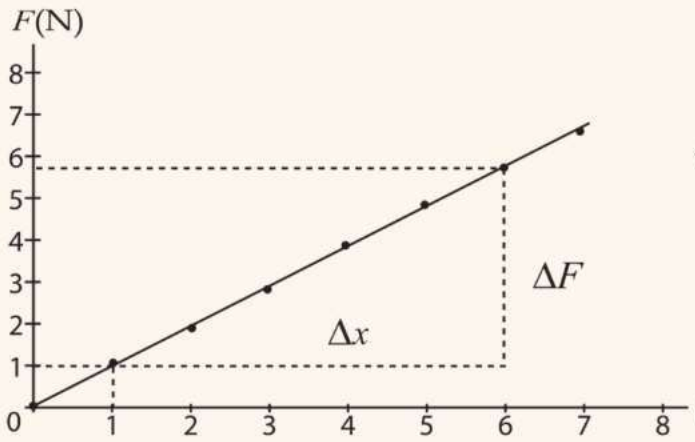
รูป การจัดอุปกรณ์สำหรับกิจกรรม 5.3

2. ใช้เครื่องชั่งสปริงออกแรงดึงสปริงผ่านนอตให้ปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุลครั้งละ 1 เซนติเมตร เมื่อนอตหยุดนิ่ง บันทึกขนาดของแรงดึงกับระยะที่สปริงยืดออกจากตำแหน่งสมดุลจนสปริงยืดออกเป็น 5 เซนติเมตร
3. เขียนกราฟระหว่างขนาดของแรงดึงกับระยะที่สปริงยืดออกโดยให้ขนาดของแรงดึงอยู่ในแกนตั้ง และระยะที่สปริงยืดออกอยู่ในแกนนอน
4. หาความชันของกราฟ
5. หางานของแรงที่ดึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากตำแหน่งสมดุล จากกราฟในข้อ 3.
6. เขียนกราฟระหว่างงานของแรงที่ดึงที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากตำแหน่งสมดุลอยู่ในแกนตั้งกับกำลังสองของระยะที่สปริงยืดออกอยู่ในแกนนอน และหาความชันของกราฟ

ตารางบันทึกผลการทดลอง

ระยะที่สปริงยืดออก (cm)	0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0
ขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริง (N)	0	1.00	1.85	2.80	3.85	4.80	5.70	6.60

กราฟระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออกเป็นดังนี้



$$\text{ความชัน} = \frac{\Delta F}{\Delta x}$$

$$= \frac{5.70\ \text{N} - 1.00\ \text{N}}{0.06\ \text{m} - 0.01\ \text{m}}$$

$$= 94\ \text{N/m}$$

รูป กราฟระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก

การสรุปและอภิปรายผล

จากการทดลองพบว่า เมื่อออกแรงที่ใช้ดึงสปริงเพิ่มขึ้น ระยะที่สปริงยืดออกจะเพิ่มขึ้นด้วย เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริงกับระยะที่สปริงยืดออก จะได้เส้นตรงผ่านจุดกำเนิด แสดงว่า ขนาดของแรงที่ใช้ดึงสปริง F แปรผันกับระยะที่สปริงยืดออก x ซึ่งเขียนได้ว่า

$$F \propto x$$

หรือเขียนเป็นสมการได้ว่า $F = kx$

เมื่อ k เป็นค่าคงตัวของการแปรผัน และเป็นความชันของกราฟเส้นตรงที่ผ่านจุดกำเนิด ความชันของกราฟระหว่างแรงที่ใช้ดึงสปริง F กับระยะที่สปริงยืดออก x มีค่า 94 นิวตันต่อเมตร

ข้อเสนอแนะ

1. การจัดอุปกรณ์ ควรให้ตะขอของเครื่องชั่งสปริง และตะขอของสปริงอยู่ในแนวระดับ
2. ควรทำเครื่องหมายที่ปลายสุดท้ายของสปริงเป็นตำแหน่งของการสังเกตเพื่อวัดระยะยืด
3. วางไม้บรรทัดให้ใกล้กับสปริงมากที่สุด และขณะอ่านระยะยืดของสปริงควรให้สายตาอยู่ในแนวตั้งฉากกับไม้บรรทัดกับปลายสุดท้ายที่ทำเครื่องหมาย
4. การกำหนดสเกลของกราฟควรกำหนดให้เหมาะสม เพื่อให้ง่ายต่อการบันทึก
5. ระวังอย่าดึงสปริงจนเกินขีดจำกัดความยืดหยุ่นของสปริง เพราะอาจทำให้ตำแหน่งสมดุลของสปริงเปลี่ยนไป

ภาคผนวก ฉ ลอการิทึม

ลอการิทึม (logarithm) เรียกย่อว่า ล็อก (log) ถูกกำหนดดังนี้

ถ้า $N = A_x$ ดังนั้น $\log_A N = x$

$\log_A N = x$ อ่านว่า ลอการิทึมของจำนวน N บนฐาน A เท่ากับจำนวน x (ซึ่งเป็นเลขชี้กำลังของ A)

ลอการิทึมที่ใช้กันมี 2 ชนิด คือ

1. ลอการิทึมสามัญ (common logarithm) เป็นลอการิทึมที่มีฐานเป็น 10 เขียนแทนด้วย $\log_{10}$ หรือ log ถ้า $N = 10^x$ ดังนั้น $x = \log_{10} N = \log N$

2. ลอการิทึมธรรมชาติ (natural logarithm) เป็นลอการิทึมที่มีฐานเป็น $e = 2.718$ เขียนแทนด้วย $\log_e$ หรือ ln ถ้า $N = e^x$ ดังนั้น $x = \log_e N = \ln N$

สมบัติสำคัญของลอการิทึม มีดังนี้

$$\log(ab) = \log a + \log b \quad (1)$$

$$\log\left(\frac{a}{b}\right) = \log a - \log b \quad (2)$$

$$\log a^n = n \log a \quad (3)$$

สมบัติทั้งสามข้อนี้ใช้ได้ทั้งลอการิทึมสามัญ ลอการิทึมธรรมชาติ และแบบอื่น ๆ

ลอการิทึมสามัญและลอการิทึมธรรมชาติมีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\log N = 0.4343 \ln N \text{ หรือ} \quad (4)$$

$$\ln N = 2.3026 \log N \quad (5)$$

ในหนังสือเรียนฟิสิกส์ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย มีสูตรและสมการที่เกี่ยวกับลอการิทึม ดังนี้

$\beta = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$, $m = m_0 e^{-\lambda t}$, $N = N_0 e^{-\lambda t}$ และ $A = A_0 e^{-\lambda t}$

ลอการิทึมของจำนวนบางจำนวนที่ควรจำได้ ได้แก่

$\log 1 = 0$, $\log 2 = 0.301$, $\log e = 0.434$, $\log 5 = 0.699$, $\log 10 = 1$, $\ln 2 = 0.693$, $\ln e = 1$

ในการหาค่าของลอการิทึมของจำนวนใด ๆ ต้องอาศัยตารางต่อไปนี้

ตาราง ฉ. 1 ลอการิทึมสามัญ

N	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.000	0.041	0.079	0.114	0.146	0.176	0.204	0.230	0.255	0.279
2	0.301	0.322	0.342	0.362	0.380	0.398	0.415	0.431	0.447	0.462
3	0.477	0.491	0.505	0.519	0.531	0.544	0.556	0.568	0.580	0.591
4	0.602	0.613	0.623	0.633	0.643	0.653	0.663	0.672	0.681	0.690
5	0.699	0.708	0.716	0.724	0.732	0.740	0.748	0.756	0.763	0.771
6	0.778	0.785	0.792	0.799	0.806	0.813	0.820	0.826	0.833	0.839
7	0.845	0.851	0.857	0.863	0.869	0.875	0.881	0.886	0.892	0.898
8	0.903	0.908	0.914	0.919	0.924	0.929	0.935	0.940	0.944	0.949
9	0.954	0.959	0.964	0.968	0.973	0.978	0.982	0.987	0.991	0.996

ตารางนี้สามารถหาค่าของลอการิทึมของจำนวนระหว่าง 1.0 และ 9.9 จำนวนที่น้อยกว่า 1.0 และมากกว่า 9.9 ให้ใช้สมบัติข้อ (1) $\log(ab) = \log a = \log b$ ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง 1 จงหา log(420) และ log(0.73)

แนวคิด ในที่นี้ $N = 420$ และ 0.73 ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าของ log(420) และ log(0.73) โดยตรงจากตารางได้ ต้องใช้สมบัติของลอการิทึม จากนั้นใช้ตาราง

วิธีทำ

$$\begin{aligned}\log(420) = \log(4.2\times10^{2}) &= \log(4.2) + \log(10^{2})\\ &= 0.623 + 2\\ &= 2.623\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\log(0.73) = \log(7.3\times10^{-1}) &= \log(7.3) + \log(10^{-1})\\ &= 0.863 + (-1)\\ &= -0.137\end{aligned}$$

ตอบ ค่า log(42) และ log(0.73) เท่ากับ 2.623 และ -0.137 ตามลำดับ

ในกรณีที่ทราบค่าของลอการิทึม เช่น $\log N = 3.748$ เราสามารถหา N โดยการกระทำย้อนกลับ ดังตัวอย่าง

ตัวอย่าง 2 จงหา $\log N = 3.748$ จงหา N

แนวคิด เปรียบเทียบค่า N กับ ลอการิทึมที่ให้ค่า 3.748

วิธีทำ

$$\log N = 3 + 0.748$$
$$= \log(10^3) + \log(5.6) = \log(5.6 \times 10^3) = \log(5600)$$
$$N = 5600$$

ตอบ N เท่ากับ 5600

คำศัพท์

บทที่ 8 การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

การสั่น (vibration)
การแกว่งกวัด (oscillation)
การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (simple harmonic motion)
ตำแหน่งสมดุล (equilibrium position)
คาบ (period)
ความถี่ (frequency)
เวกเตอร์บอกตำแหน่ง (position vector)
การกระจัด (displacement)
แอมพลิจูด (amplitude)
อัตราเร็วเชิงมุม (angular speed)
ความถี่เชิงมุม (angular frequency)
มุมเฟส (phase angle)
เรเดียน (radian)
แรงดึงกลับ (restoring force)
จุดมวล (point mass)
ความถี่ธรรมชาติ (natural frequency)
การสั่นพ้อง (resonance)

บทที่ 9 คลื่น

คลื่น (wave)
คลื่นกล (mechanical waves)
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic waves)
คลื่นตามขวาง (transverse waves)
คลื่นตามยาว (longitudinal waves)
คลื่นดล (pulse wave)
คลื่นต่อเนื่อง (continuous waves)
สันคลื่น (crest)
ท้องคลื่น (trough)
ความยาวคลื่น (wavelength)
หน้าคลื่น (wave-front)
คลื่นระนาบ (plane waves)
หลักการของฮอยเกนส์ (Huygens' principle)
หลักการซ้อนทับ (principle of superposition)
การแทรกสอด (interference)
แทรกสอดแบบเสริมกัน (constructive interference)
การแทรกสอดแบบหักล้างกัน (destructive interference)
คลื่นตกกระทบ (incident waves)
คลื่นสะท้อน (reflected waves)
เส้นรังสี (ray)
คลื่นหักเห (refracted waves)
คลื่นที่ผ่านไป (transmitted waves)
จุดปฏิบัพ (antinode)
จุดบัพ (node)
คลื่นนิ่ง (standing wave)
แหล่งกำเนิดอาพันธ์ (coherent sources)
ผลต่างระยะทาง (path difference)
การเลี้ยวเบน (diffraction)

บทที่ 10 แสงเชิงคลื่น

การแทรกสอด (interference)
สลิตเดี่ยว (single slit)
สลิตคู่ (double slit)
แหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์ (coherent light source)
เฟสตรงกัน (in phase)
เฟสตรงข้าม (out of phase)
กรอบ (envelope)
เกรตติง (grating)

บทที่ 11 แสงเชิงรังสี

รังสีของแสง (light ray)
การสะท้อนของแสง (reflection of light)
มุมตกกระทบ (angle of incidence)
มุมสะท้อน (angle of reflection)
เส้นแนวฉาก (normal line)
รังสีสะท้อน (reflected ray)
การหักเหของแสง (refraction of light)
รังสีหักเห (refracted ray)
ดรรชนีหักเห (index of refraction)
กฎของสเนลล์ (Snell's law)
การสะท้อนกลับหมด (total internal reflection)
มุมวิกฤต (critical angle)
การกระจายแสง (dispersion of light)
สเปกตรัม (spectrum)
จอตา (retina)
การเกิดภาพ (image formation)

เลนส์นูน (convex lens)
เลนส์เว้า (concave lens)
เส้นแกนมุขสำคัญ (principal axis)
โฟกัส (focus)
ความยาวโฟกัส (focal length)
เลนส์รวมแสง (converging lens)
ภาพจริง (real image)
ภาพเสมือน (virtual image)
กำลังขยาย (magnification)
เลนส์กระจายแสง (diverging lenses)
กระจกเงาโค้ง (curved mirror)
การจกเงาทรงกลม (spherical mirror)
กระจกโค้งนูน (convex mirror)
กระจกโค้งเว้า (concave mirror)
เซลล์รูปกรวย (cone cell)
แสงสีปฐมภูมิ (primary colours of light)
การบอดสี (colour blindness)
การทดสอบกรมองเห็นสี (colour vision test)
การทดสอบอิชิฮารา (Ishihara test)
แผ่นกรองแสงสี (colour filter)
สารสี (pigment)
สารสีปฐมภูมิ (primary colours of pigment)
รุ้ง (rainbow)
การทรงกลด (halo)
มิราจ (mirage)
การกระเจิง (scattering)
กล้องโทรทรรศน์ (telescope)
เลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens)
เลนส์ใกล้ตา (eyepiece lens)
กล้องจุลทรรศน์ (microscope)
กล้องถ่ายรูป (camera)
ฟิล์มถ่ายรูป (photographic film)
ไดอะแฟรม (diaphragm)
ชัตเตอร์ (shutter)
เซนเซอร์รับภาพ (image sensor)
พิกเซล (pixel)

บรรณานุกรม

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2548). **หนังสือเรียนสาระการเรียนรู้พื้นฐานและเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 3.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์คุรุสภาลาดพร้าว.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2558). **หนังสือเรียนรู้เพิ่มเติมเพื่อเสริมศักยภาพ ฟิสิกส์ เล่ม 1.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : บริษัท พัฒนาคุณภาพวิชาการ (พว.) จำกัด.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2558). **หนังสือเรียนรู้เพิ่มเติมเพื่อเสริมศักยภาพ ฟิสิกส์ เล่ม 3.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). กรุงเทพฯ : บริษัท พัฒนาคุณภาพวิชาการ (พว.) จำกัด.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2559). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 1.** (พิมพ์ครั้งที่ 9). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2559). **หนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม ฟิสิกส์ เล่ม 3.** (พิมพ์ครั้งที่ 9). กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์ สกสค. ลาดพร้าว.

Giancoli, D. C. (2014). Physics: **Principles with Applications.** (7th ed). Pearson.

Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2013). **Fundamentals of Physics.** (10th ed). John Wiley & Sons, Inc.

Serway, R. A., Faughn, J. S. (2009). **Holt Physics.** Holt, Rinehart and Winston.

Serway, R. A., Jewett, Jr., J. W. (2014). **Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics.** (9th ed). Brooks/Cole.

Young, H. D., Freedman, R. A. (2015). **Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics.** (14th ed). Pearson.

ที่มาของรูป

หน้า	รูป	ที่มา
1	รูป ลูกตุ้มนาฬิกา	winterseitler from Pixabay
47	รูป คลื่นน้ำ	Michelle Maria from Pixabay
105	รูป ฟองสบู่	Alexas_Fotos from Pixabay
164	รูป ตัวสะท้อนแสงเลเซอร์บนดวงจันทร์	NASA

คณะกรรมการจัดทำหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ เล่ม 3 ตามผลการเรียนรู้ กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (ฉบับปรับปรุง พ.ศ. 2560) ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551

คณะที่ปรึกษา

1. ศ. ดร.ชูกิจ ลิมปิจำนงค์	ผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. ดร.วนิดา ธนประโยชน์ศักดิ์	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้จัดทำหนังสือเรียน รายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่ม 3

1. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัศวพิภพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. ผศ. ดร.นฤมล สุวรรณจันทร์ดี	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. ผศ. ดร.ขวัญ อารยะธนิตกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล
4. รศ. ดร.พวงรัตน์ ไพเราะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
5. ผศ. ดร.พรรัตน์ วัฒนกสิวิชช์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
6. รศ. ดร.วิวัธน์ ยังดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
7. นายสุมิตร สวนสุข	โรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย
8. นายรังสรรค์ ศรีสาคร	ผู้เชี่ยวชาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
9. นายบุญชัย ตันไถง	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
10. นายวัฒนะ มากชื่น	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
11. นายโฆสิต สิงหสุต	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
12. นายรักษพล ธนานุวงศ์	นักวิชาการอาวุโส สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
13. ดร.กวิน เชื่อมกลาง	นักวิชาการอาวุโส สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

14. ดร.ปรีดา พัชรมณีปกรณ์	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
15. ดร.จำเริญตา ปริญญาธารมาศ	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
16. นายสรจิตต์ อารีรัตน์	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
17. นายจอมพรรค นวลดี	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
18. นายเทพนคร แสงหัวช้าง	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
19. นายธนะรัชต์ คัณทักษ์	นักวิชาการ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

คณะผู้ร่วมพิจารณาหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ฟิสิกส์ ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 เล่ม 3 (ฉบับร่าง)

1. นายประสิทธิ์ สลัดทุกข์	โรงเรียนย่านตาขาวรัฐชนูปถัมภ์ จ.ตรัง
2. นายนิกรณ์ นิลพงษ์	โรงเรียนศรีคูณวิทยบัลลังก์ จ.อำนาจเจริญ
3. นางอรชา ชูเชื้อ	โรงเรียนดีบุกพังงาวิทยายน จ.พังงา
4. นางมลิวัลย์ เลาหสูต	โรงเรียนกันทรลักษ์วิทยา จ.ศรีสะเกษ
5. นางสาวสายพิณ สุวรรณฤทธิ์	โรงเรียนวังไกลกังวล จ.ประจวบคีรีขันธ์
6. นางสาวสายชล สุขโข	โรงเรียนจ่านกร้อง จ.พิษณุโลก
7. นายชรินทร์ วัฒนธีรางกูร	โรงเรียนพระปฐมวิทยาลัย จ.นครปฐม
8. นายบุญโฮม สุขล้วน	โรงเรียนรัตนโกสินทร์สมโภชลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร
9. นายเอกพงษ์ หิรัญสิริสวัสดิ์	โรงเรียนดรุณสิกขาลัย (โครงการ วมว.) กรุงเทพมหานคร
10. นายศักดิ์ สุวรรณฉาย	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
11. นางสาวเพ็ญพนัส เค้ากล้า	โรงเรียนปทุมคงคา กรุงเทพมหานคร
12. นายพลพิพัฒน์ วัฒนเศรษฐานุกุล	สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาเขต 2 กรุงเทพมหานคร

คณะบรรณาธิการ

1. รศ. ดร.อนันตสิน เตชะกำพุช	นักวิชาการอิสระ
2. ผศ. ดร.บุรินทร์ อัศวพิภพ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. นายบุญชัย ตันไถง	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. นายวัฒนะ มากชื่น	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
5. นายโฆสิต สิงหสุต	ผู้ชำนาญ สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
6. ดร.กวิน เชื่อมกลาง	นักวิชาการอาวุโส สาขาวิทยาศาสตร์มัธยมศึกษาตอนปลาย สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ค่าคงตัวและข้อมูลทางกายภาพอื่น ๆ

ค่าคงตัว

ปริมาณ	สัญลักษณ์	ค่าประมาณ
อัตราเร็วของแสง	c , c_0	3.0×10^{8} m s^{-1}
ค่าคงตัวโน้มถ่วง	G	6.6726×10^{-11} m^{3} kg^{-1} s^{-2}
ค่าคงตัวพลังค์	h	6.6261×10^{-34} J s
ประจุมูลฐาน	e	1.6022×10^{-19} C
ค่าคงตัวริดเบิร์ก	R_∞	1.0974×10^{7} m^{-1}
รัศมีโบร์	a_0	5.2918×10^{-11} m
มวลอิเล็กตรอน	m_e	9.1094×10^{-31} kg
มวลโปรตอน	m_p	1.6726×10^{-27} kg
มวลนิวตรอน	m_n	1.6749×10^{-27} kg
มวลดิวเทอรอน	m_d	3.3436×10^{-27} kg
ค่าคงตัวอาโวกาโดร	N_A , L	6.0221×10^{23} mol^{-1}
ค่าคงตัวมวลอะตอม	m_u	1.6605×10^{-27} kg
ค่าคงตัวแก๊ส	R	8.3145 J mol^{-1} K^{-1}
ค่าคงตัวโบลต์ซมันน์	k_B	1.3807×10^{-23} J K^{-1}

ข้อมูลทางกายภาพอื่น ๆ

ปริมาณ	ค่า
มวลของโลก	5.97×10^{24} kg
มวลของดวงจันทร์	7.36×10^{22} kg
มวลของดวงอาทิตย์	1.99×10^{30} kg
รัศมีของโลก (เฉลี่ย)	6.38×10^{3} km
รัศมีของดวงจันทร์ (เฉลี่ย)	1.74×10^{3} km
รัศมีของดวงอาทิตย์ (เฉลี่ย)	6.96×10^{5} km
ระยะทางระหว่างโลกและดวงจันทร์ (เฉลี่ย)	3.84×10^{5} km
ระยะทางระหว่างโลกและดวงอาทิตย์ (เฉลี่ย)	1.496×10^{8} km

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กระทรวงศึกษาธิการ