รายวิชาฟิสิกส์ 3 (ว32203) · ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5

กลศาสตร์การสั่น คลื่น และทัศนศาสตร์

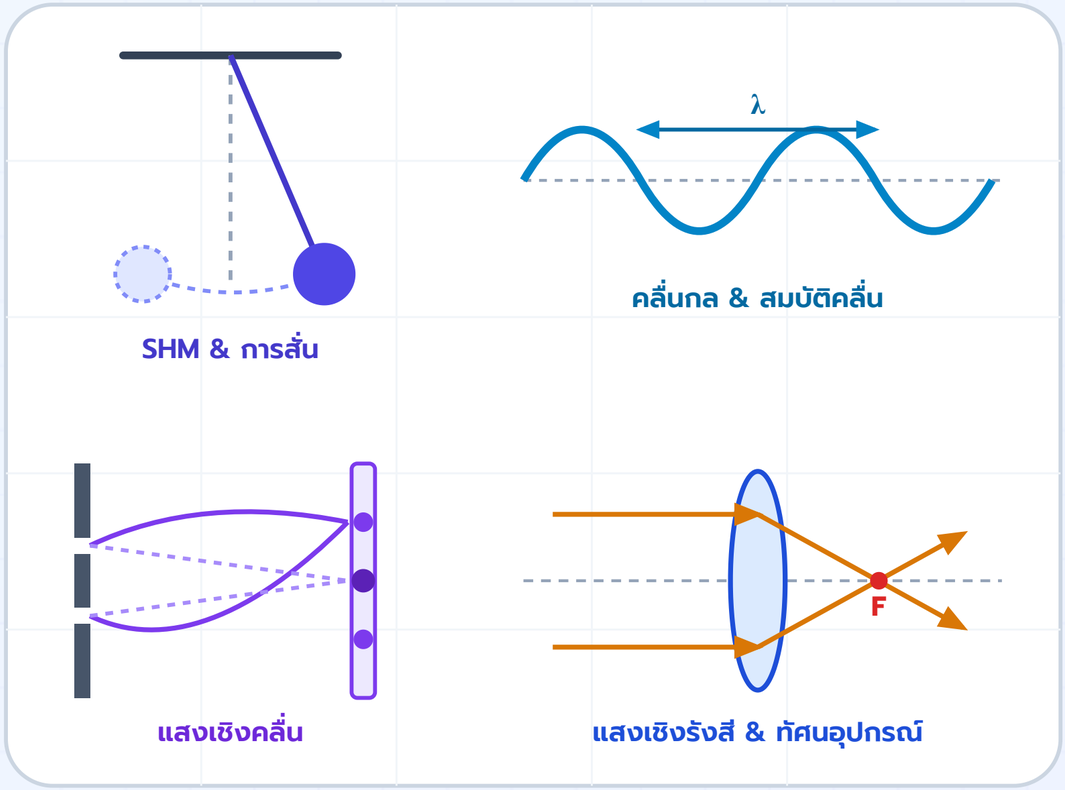
การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย คลื่นกล แสงเชิงคลื่น และแสงเชิงรังสี

บทที่ 1
การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย (SHM)

บทที่ 2
คลื่นกลและสมบัติของคลื่น

บทที่ 3
แสงเชิงคลื่น

บทที่ 4
แสงเชิงรังสีและทัศนอุปกรณ์



หัวข้อการเรียนรู้รายวิชาฟิสิกส์ 3 (ว32203)

บทที่ 1 · Simple Harmonic Motion

การเคลื่อนที่แบบ SHM

- **แรงดึงกลับ** $F = -kx$ และ $a = -\omega^2 x$
- **สมการการเคลื่อนที่** x, v, a และกราฟเฟส
- **สปริง vs ลูกตุ้ม** และการอนุรักษ์พลังงานกล
- **ความถี่ธรรมชาติ** และการสั่นพ้อง

บทที่ 2 · Mechanical Waves

คลื่นกล (Waves)

- **องค์ประกอบคลื่น** อัตราเร็ว $v = f\lambda$ และเฟส
- **การสะท้อน** (ปลายตรึง / ปลายอิสระ)
- **การหักเห** ตามกฎของสเนลล์ (f คงตัว)
- **การแทรกสอด การเลี้ยวเบน** และคลื่นนิ่ง

บทที่ 3 · Wave Optics

แสงเชิงคลื่น

- **สลิตคู่ของยัง** แถบสว่าง-แถบมืด
- **สลิตเดี่ยว** กับแถบสว่างกลางกว้าง 2 เท่า
- **เกรตติงเลี้ยวเบน** และการแยกสเปกตรัม
- **การกระเจิงของแสง** และฟิล์มบาง

บทที่ 4 · Ray Optics

แสงเชิงรังสี

- **กระจกเงาราบ** และกระจกทรงกลม
- **ความลึกปรากฏ** มุมวิกฤต & Optical Fiber
- **เลนส์บาง** และการกำหนดเครื่องหมาย $+/-$
- **ทัศนอุปกรณ์** สายตา และความสว่าง (lux)

ความเชื่อมโยงของเนื้อหา: เริ่มจากการสั่นของอนุภาคเดี่ยว (**SHM**) → การส่งผ่านพลังงานของการสั่นไปในตัวกลาง (**คลื่นกล**) → สมบัติการแทรกสอดและเลี้ยวเบนของแสง (**แสงเชิงคลื่น**) → การเดินทางของแสงผ่านกระจกและเลนส์ (**แสงเชิงรังสี**)

บทที่ 1: ทำไมลูกตุ้มและสายกีตาร์จึงสั่นด้วยจังหวะคงที่?

คำถามชวนคิด

“เมื่อดึงลูกตุ้มหรือดีดสายกีตาร์ให้พ้นจากตำแหน่งสมดุล เหตุใดระบบจึงพยายามดึงตัวเองกลับสู่จุดเดิมซ้ำๆ ด้วยคาบเวลาที่สม่ำเสมอ?”

1. จุดสมดุล (Equilibrium)
ตำแหน่งที่แรงลัพธ์เป็นศูนย์ แต่วัตถุมีความเร็วสูงสุดจึงพุ่งเลยผ่านไป

2. แรงดึงกลับ (Restoring Force)
แรงมีทิศชี้เข้าหาจุดสมดุลเสมอ และแปรผันตรงกับการกระจัด

3. การสั่นซ้ำรอบ (Periodic)
เคลื่อนที่กลับไปกลับมาบนเส้นทางเดิมด้วยแอมพลิจูดและคาบคงที่

ตัวอย่างการสั่นแบบ SHM ในชีวิตจริง

- **นาฬิกาลูกตุ้ม** ที่แกว่งด้วยมุมเล็กๆ ควบคุมเวลาอย่างแม่นยำ
- **โช้คอัพและสปริงรถยนต์** ซับแรงสั่นสะเทือนบนท้องถนน
- **การสั่นของสายกีตาร์และส้อมเสียง** ก่อให้เกิดคลื่นเสียงดนตรี
- **การสั่นของผลึกควอตซ์** ในนาฬิกาดิจิทัลและวงจรอิเล็กทรอนิกส์

ลักษณะสำคัญของ SHM และแรงดึงกลับ (Restoring Force)

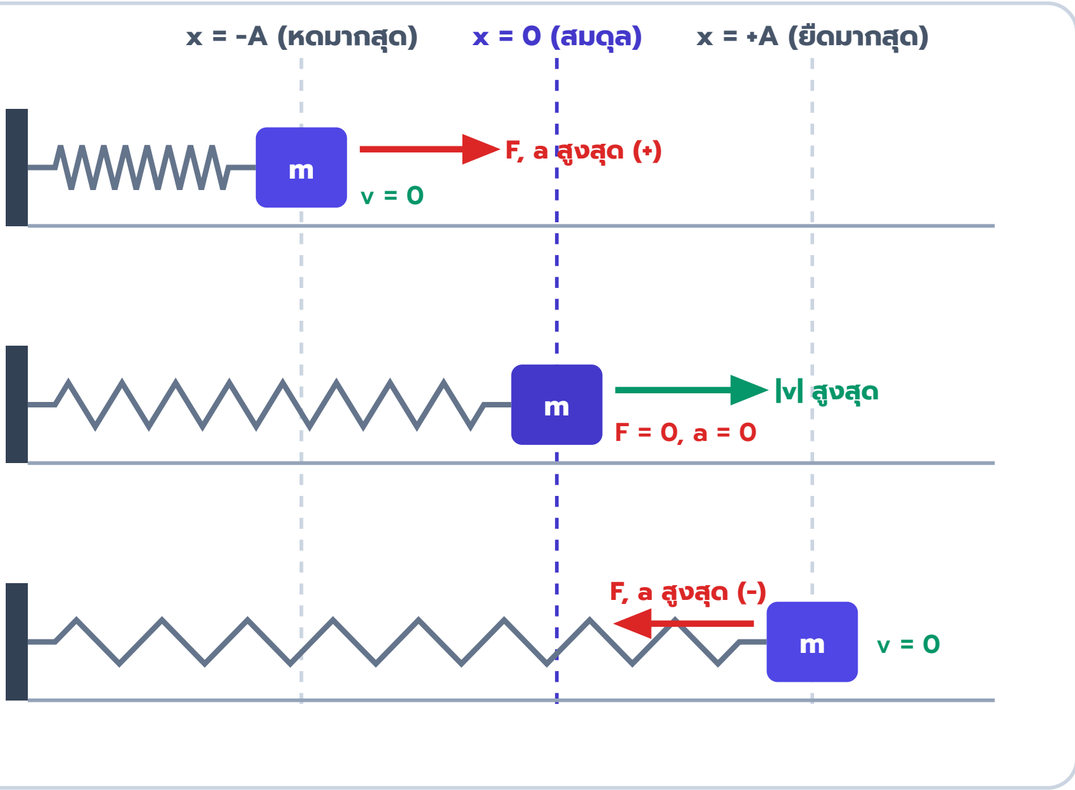
เงื่อนไขนิยามของ SHM

- **แรงดึงกลับ ($\vec{F}$)** มีทิศตรงข้ามกับการกระจัด ($\vec{x}$) และแปรผันตรงกับขนาดของการกระจัดเสมอ
- **ความเร่ง ($\vec{a}$)** มีทิศชี้เข้าหาตำแหน่งสมดุลตลอดเวลา

$$F = -kx \qquad \text{และ} \qquad a = -\omega^2 x$$

จุดสำคัญที่ต้องจำแม่น

- **ที่ตำแหน่งสมดุล ($x = 0$):** แรงและความเร่งเป็นศูนย์ ($F = 0, a = 0$) แต่**อัตราเร็วสูงสุด** ($v_{\max} = \omega A$)
- **ที่ตำแหน่งปลายสุด ($x = \pm A$):** อัตราเร็วเป็นศูนย์ ($v = 0$) แต่**แรงและความเร่งสูงสุด** ($a_{\max} = \omega^2 A$)



ปริมาณพื้นฐานของ SHM และเงาของการเคลื่อนที่แบบวงกลม

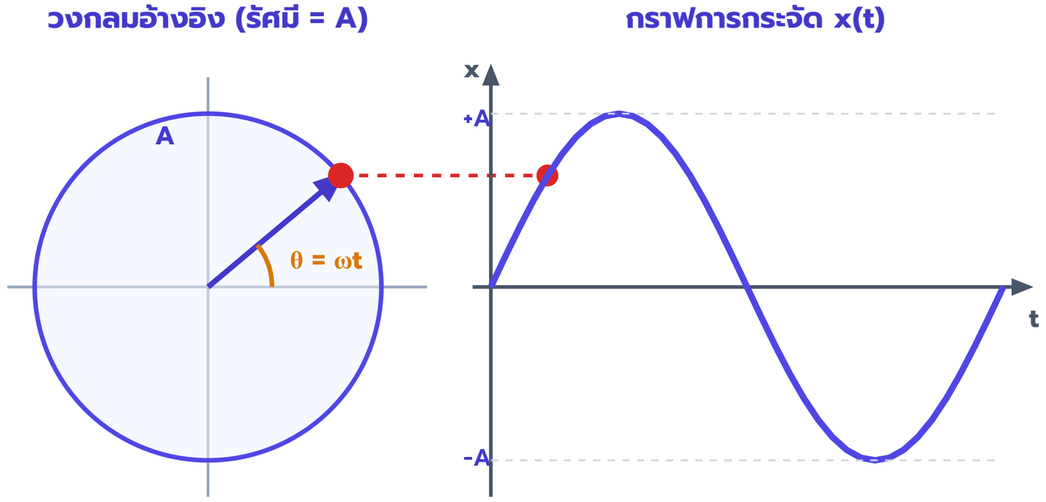
ปริมาณพื้นฐานที่ใช้อธิบายการสั่น

- **แอมพลิจูด (A):** การกระจัดสูงสุดวัดจากสมดุล (หน่วย m)
- **คาบ (T):** เวลาที่ใช้สั่นครบ 1 รอบ (หน่วย s)
- **ความถี่ (f):** จำนวนรอบใน 1 วินาที (หน่วย Hz)
- **อัตราเร็วเชิงมุม (ω):** มุมเฟสที่เปลี่ยนไปต่อเวลา (rad/s)

$$f = \frac{1}{T} \qquad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

ความเชื่อมโยงกับวงกลมอ้างอิง

- เมื่อวัตถุหมุนเป็นวงกลมรัศมี A ด้วยอัตราเร็วเชิงมุม ω คงตัว **เงาบนแกนตั้งหรือแกนนอน** จะเคลื่อนที่แบบ SHM
- **เฟส ($\phi = \omega t + \phi_0$):** บอกตำแหน่งและทิศทางการเคลื่อนที่



เงาของการเคลื่อนที่วงกลมสม่ำเสมอ = การเคลื่อนที่แบบ SHM

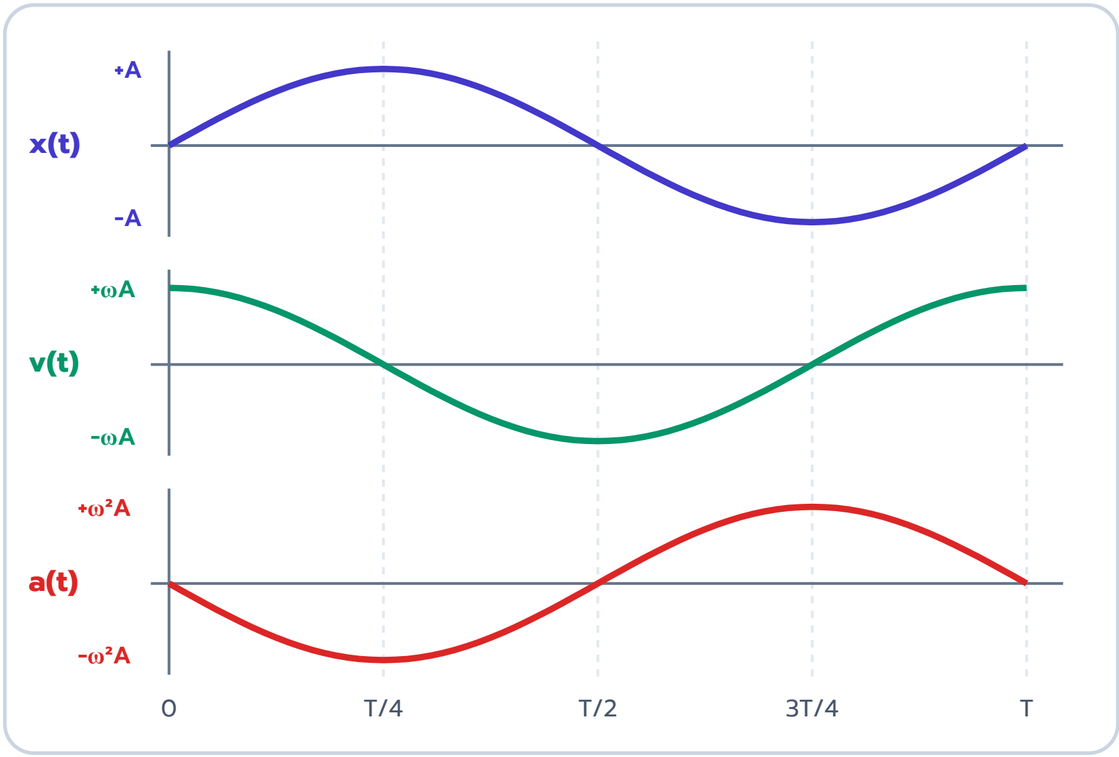
สมการการกระจัด ความเร็ว ความเร่ง และความต่างเฟส

สมการที่เวลา t ใดๆ (เมื่อเริ่มจากสมดุล $\phi_0 = 0$)

$$x(t) = A\sin(\omega t + \phi_0)$$
$$v(t) = \omega A\cos(\omega t + \phi_0) = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2}$$
$$a(t) = -\omega^2 A\sin(\omega t + \phi_0) = -\omega^2 x$$

สรุปความต่างเฟสและค่าสูงสุด

- v **มีเฟสนำ** x อยู่ $\frac{\pi}{2}$ rad (90°) $\rightarrow v_{\max} = \omega A$
- a **มีเฟสนำ** v อยู่ $\frac{\pi}{2}$ rad (90°) $\rightarrow a_{\max} = \omega^2 A$
- a **มีเฟสตรงข้าม** x (180° หรือ π rad) เสมอ



โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: สมการ x, v, a และความต่างเฟสของ SHM

ข้อที่ 1.1: หาปริมาณการสั่นจากสมการการกระจัด

วัตถุสั่นแบบ SHM ตามสมการ $x = 0.08\sin(10t)$ เมตร จงหา **อัตราเร็วสูงสุด, ความเร่งสูงสุด** และ**ขนาดอัตราเร็ว** ขณะที่อยู่ที่การกระจัด $x = 0.04$ m

แนวคิด: เทียบกับ $x = A\sin(\omega t)$ ได้ $A = 0.08$ m และ $\omega = 10$ rad/s

1) อัตราเร็วสูงสุด: $v_{\max} = \omega A = 10 \times 0.08 = \mathbf{0.8}$ m/s

2) ความเร่งสูงสุด: $a_{\max} = \omega^2 A = 10^2 \times 0.08 = \mathbf{8.0}$ m/s^2

3) ที่ $x = 0.04$ m: $v = \omega\sqrt{A^2 - x^2} = 10\sqrt{0.08^2 - 0.04^2} = \mathbf{0.4\sqrt{3}}$ m/s ≈ 0.69 m/s

ข้อที่ 1.2: การเคลื่อนที่จากปลายสุดและการใช้เฟส

อนุภาคเคลื่อนที่แบบ SHM รอบสมดุลด้วยแอมพลิจูด 10 cm และคาบ 4 s หากเริ่มจับเวลาที่ตำแหน่งปลายสุด $+A$ เมื่อเวลาผ่านไป 0.5 s อนุภาคอยู่ห่างจากสมดุลกี่เซนติเมตร?

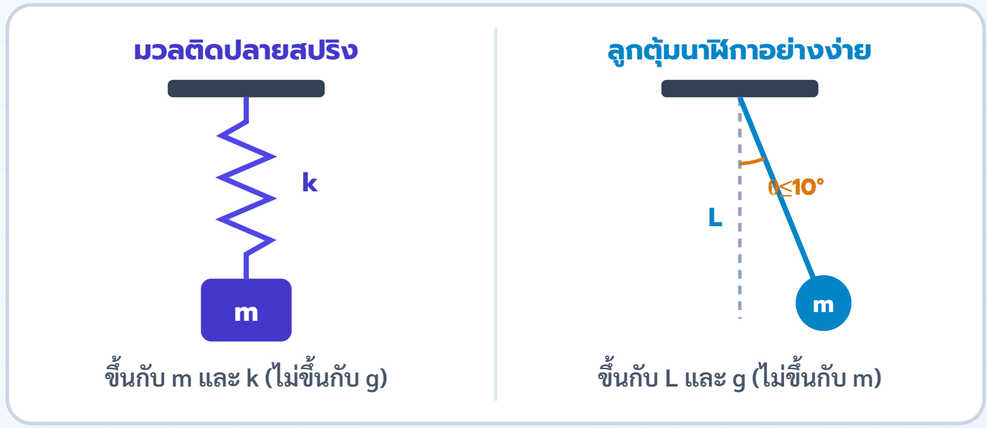
แนวคิด: เริ่มที่ปลายสุด $+A$ ใช้สมการโคไซน์ $x(t) = A\cos(\omega t)$

1) หาอัตราเร็วเชิงมุม: $\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2}$ rad/s

2) แทนเวลา $t = 0.5$ s: $\omega t = \frac{\pi}{2}(0.5) = \frac{\pi}{4}$ rad $= 45^\circ$

3) ระยะจากสมดุล: $x = 10\cos(45^\circ) = 10\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right) = \mathbf{5\sqrt{2}}$ cm ≈ 7.07 cm

มวลติดปลายสปริง vs ลูกตุ้มนาฬิกาอย่างง่าย



หัวข้อเปรียบเทียบ	มวลติดปลายสปริง (Spring-Mass)	ลูกตุ้มนาฬิกาอย่างง่าย (Simple Pendulum)
แรงดึงกลับ	แรงยืดหยุ่นของสปริง ($F = -kx$)	องค์ประกอบของน้ำหนัก ($F = -mg\sin\theta$) เมื่อมุม $\theta \leq 10^\circ$
อัตราเร็วเชิงมุม (ω)	$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$	$\omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$
คาบการแกว่ง (T)	$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$
ตัวแปรที่ไม่มีผลต่อคาบ	แอมพลิจูด A และค่าความเร่งโน้มถ่วง g	แอมพลิจูด (มุมเล็ก) และ**มวล m ของลูกตุ้ม**

โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: มวลติดปลายสปริงและลูกตุ้มนาฬิกา

ข้อที่ 1.3: การสั่นของมวลติดปลายสปริง

แขวนมวล $0.5\ \text{kg}$ กับสปริงเบา พบว่าสปริงยืดออก $2.5\ \text{cm}$ ณ สมดุล จากนั้นดึงลงอีก $4\ \text{cm}$ แล้วปล่อยให้สั่นขึ้น-ลง จงหา **ค่านิจสปริง** k และ **ความถี่การสั่น** ($g = 10\ \text{m/s}^2$)

1) ณ สมดุล: $k\Delta x = mg \Rightarrow k = \frac{0.5 \times 10}{0.025} = \mathbf{200}\ \text{N/m}$

2) หาความถี่: $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{200}{0.5}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{400} = \frac{\mathbf{10}}{\pi}\ \text{Hz} \approx 3.18\ \text{Hz}$

ข้อสังเกต: ระยะดึงปล่อย $4\ \text{cm}$ คือแอมพลิจูด A ซึ่งไม่มีผลต่อความถี่ f

ข้อที่ 1.4: ลูกตุ้มนาฬิกาบนโลกและดวงจันทร์

ลูกตุ้มนาฬิกายาว L แกว่งบนโลก ($g = 9.8\ \text{m/s}^2$) มีคาบ $2.0\ \text{s}$ หากนำลูกตุ้มเดิมไปแกว่งบนดวงจันทร์ที่มีค่า $g_{\text{จันทร์}} = \frac{1}{6}g_{\text{โลก}}$ คาบการแกว่งจะเป็นกี่วินาที?

แนวคิด: จาก $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ เมื่อ L คงตัว จะได้ว่า $T \propto \frac{1}{\sqrt{g}}$

1) ตั้งสัดส่วน: $\frac{T_{\text{จันทร์}}}{T_{\text{โลก}}} = \sqrt{\frac{g_{\text{โลก}}}{g_{\text{จันทร์}}}} = \sqrt{6}$

2) คาบใหม่: $T_{\text{จันทร์}} = 2.0\sqrt{6} \approx \mathbf{4.90}\ \text{s}$ (แกว่งช้าลงกว่าเดิม)

พลังงานในการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

กฎการอนุรักษ์พลังงานกล (ไม่มีแรงเสียดทาน)

- **พลังงานศักย์ยืดหยุ่น (E_p):** ขึ้นกับการกระจัด x
- **พลังงานจลน์ (E_k):** ขึ้นกับอัตราเร็ว v
- **พลังงานกลรวม (E):** คงตัวเสมอตลอดการเคลื่อนที่

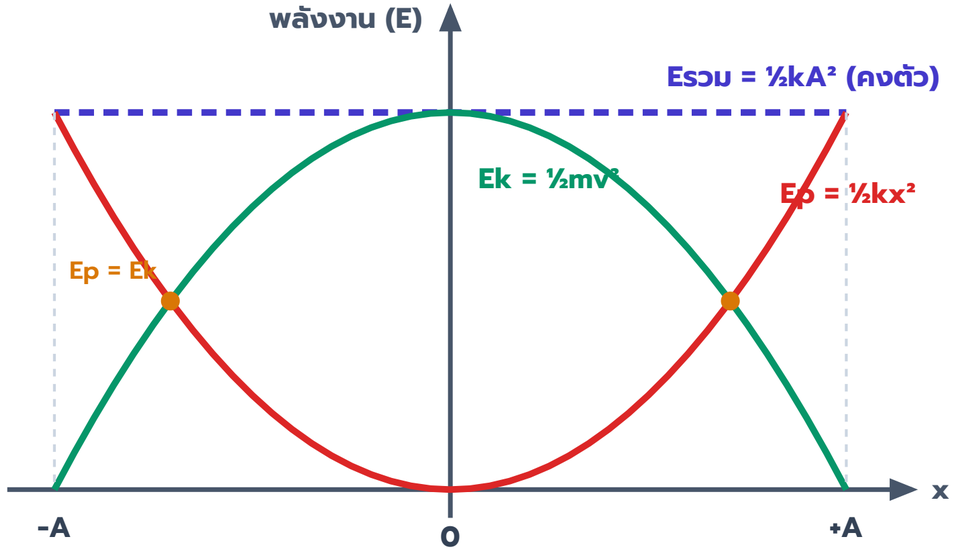
$$E_p = \frac{1}{2}kx^2 \qquad E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k(A^2 - x^2)$$

$$E_{\text{รวม}} = E_p + E_k = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

ตำแหน่งพิเศษที่ควรรู้

- ที่ $x = 0$: $E_p = 0$ และ $E_k = E_{\text{รวม}}$ (สูงสุด)
- ที่ $x = \pm A$: $E_k = 0$ และ $E_p = E_{\text{รวม}}$ (สูงสุด)
- ที่ $x = \pm\frac{A}{\sqrt{2}}$: พลังงานจลน์เท่ากับพลังงานศักย์ ($E_k = E_p$)

กราฟพลังงานกลในการเคลื่อนที่แบบ SHM



ความถี่ธรรมชาติ (Natural Frequency) และการสั่นพ้อง (Resonance)

01 · หลักการพื้นฐาน

ความถี่ธรรมชาติ (f_0)

- วัตถุแต่ละชนิดมี **ความถี่การสั่นอิสระเฉพาะตัว** เรียกว่า ความถี่ธรรมชาติ
- ขึ้นกับสมบัติโครงสร้าง เช่น ความยาวเชือก มวล และความแข็งตึง
- การแกว่งของชิงช้าที่มีความยาวเชือกค่าหนึ่ง จะมีค่า f_0 คงตัว

02 · เงื่อนไขสำคัญ

การเกิดการสั่นพ้อง

- เกิดขึ้นเมื่อ**ความถี่ของแรงกระตุ้นภายนอกเท่ากับความถี่ธรรมชาติ** ($f_{\text{กระตุ้น}} = f_0$)
- ระบบจะดูดกลืนพลังงานได้ดีที่สุด
- ส่งผลให้**แอมพลิจูดการสั่นเพิ่มขึ้นมากอย่างรวดเร็ว**

03 · ประโยชน์และอันตราย

การประยุกต์ในชีวิตจริง

- **ประโยชน์:** การไกวชิงช้า, การจูนคลื่นวิทยุ, เครื่องสร้างภาพ MRI, เตาไมโครเวฟ
- **อันตราย:** สะพานทาโคมาแนร์โรว์สพังจากลม, อาคารพังจากแผ่นดินไหว
- **การป้องกัน:** ติดตั้งตัวหน่วง (Tuned Mass Damper) ในตึกสูง

สรุปสั้นจำง่าย: สั่นพ้อง = แรงกระตุ้นจังหวะตรงกับจังหวะธรรมชาติ ($f = f_0$) $\rightarrow$ แอมพลิจูดสูงสุด!

โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: พลังงานกลใน SHM และการสั่นพ้อง

ข้อที่ 1.5: สัดส่วนพลังงานจลน์และพลังงานศักย์

มวล $2\ \text{kg}$ ติดสปริง $k = 200\ \text{N/m}$ สั่นแบบ SHM ด้วยแอมพลิจูด $0.1\ \text{m}$ จงหา **พลังงานกลรวม** และ ณ ตำแหน่ง $x = 0.06\ \text{m}$ วัตถุมี **พลังงานจลน์เท่าใด**?

1) พลังงานกลรวม: $E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}(200)(0.1)^2 = \mathbf{1.0}\ \text{J}$

2) พลังงานศักย์ที่ $x = 0.06\ \text{m}$: $E_p = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}(200)(0.06)^2 = 0.36\ \text{J}$

3) พลังงานจลน์: $E_k = E - E_p = 1.0 - 0.36 = \mathbf{0.64}\ \text{J}$

ข้อที่ 1.6: การหาความถี่ธรรมชาติและเงื่อนไขการสั่นพ้อง

ลูกตุ้มชุดหนึ่งยาว $0.4\ \text{m}$ แกว่งด้วยความถี่ธรรมชาติ f_0 ($g = \pi^2\ \text{m/s}^2$) หากต้องการกระตุ้นด้วยแรงเป็นจังหวะให้เกิด**การสั่นพ้อง** แรงกระตุ้นต้องมีคาบเวลากี่วินาที?

1) หาคาบธรรมชาติของลูกตุ้ม: $T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} = 2\pi\sqrt{\frac{0.4}{\pi^2}} = 2\sqrt{0.4} \approx 1.26\ \text{s}$

2) เงื่อนไขการสั่นพ้อง: $f_{\text{กระตุ้น}} = f_0 \iff T_{\text{กระตุ้น}} = T_0$

3) ดังนั้นต้องออกแรงกระตุ้นทุกๆ 1.26 **วินาที** แอมพลิจูดจึงจะเพิ่มขึ้นสูงสุด

โจทย์ฝึกทำท้ายบทที่ 1: วิเคราะห์กราฟและการเปรียบเทียบระบบสั่น

ข้อที่ 1.7: อ่านค่าและสร้างสมการจากกราฟ SHM

จากกราฟการกระจัดกับเวลาของ SHM พบว่าระยะระหว่างยอดคลื่นถึงท้องคลื่นตามแกนตั้งเท่ากับ $20\ \text{cm}$ และเวลาจากสมดุลไปถึงยอดคลื่นครั้งแรกเท่ากับ $0.25\ \text{s}$ จงหา A, T และ $v_{\max}$

1) ยอดถึงท้อง $= 2A = 20\ \text{cm} \Rightarrow A = 10\ \text{cm} = \mathbf{0.10}\ \text{m}$

2) สมดุลไปยอดคลื่นครั้งแรก $= \frac{T}{4} = 0.25\ \text{s} \Rightarrow T = \mathbf{1.0}\ \text{s}$

3) อัตราเร็วเชิงมุม $\omega = \frac{2\pi}{1.0} = 2\pi\ \text{rad/s} \Rightarrow v_{\max} = \omega A = \mathbf{0.2}\pi\ \text{m/s}$

ข้อที่ 1.8: เปรียบเทียบสปริง 2 กรณี

มวล m ติดสปริง k สั่นด้วยความถี่ $6\ \text{Hz}$ หากเปลี่ยนเป็นมวล $4m$ ติดกับสปริงเดิม ความถี่ใหม่จะเป็นกี่เฮิรตซ์? และถ้าต้องการให้พลังงานรวมเท่าเดิม ต้องปรับแอมพลิจูดอย่างไร?

1) จาก $f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow f \propto \frac{1}{\sqrt{m}}$ เมื่อมวลเพิ่ม 4 เท่า ความถี่ลดลง $\sqrt{4} = 2$ เท่า

ดังนั้นความถี่ใหม่ $f' = \frac{6}{2} = \mathbf{3}\ \text{Hz}$

2) จาก $E = \frac{1}{2}kA^2$ (ไม่ขึ้นกับมวล m!) หาก k และ A เท่าเดิม พลังงานรวม**เท่าเดิมอยู่แล้ว**

บทที่ 2: คลื่นส่งผ่านพลังงานโดยไม่พาตัวกลางไปด้วยได้อย่างไร?

คำถามชวนคิด

“เมื่อโยนก้อนหินลงกลางสระน้ำ ใบไม้ที่ลอยอยู่บนผิวน้ำกลับแค่กระเพื่อมขึ้น-ลงอยู่กับที่ ไม่ได้ไหลตามคลื่นเข้าฝั่งเพราะเหตุใด?”

การถ่ายโอนพลังงาน
คลื่นเกิดจากการรบกวนตัวกลางแล้ว**ส่งผ่านพลังงาน**ต่อเนื่องกันไป

อนุภาคตัวกลางสั่นอยู่กับที่
โมเลกุลน้ำสั่นรอบสมดุล (SHM) ไม่ได้เคลื่อนที่ย้ายตำแหน่งไปกับคลื่น

เชื่อมโยงสู่ชีวิตจริง
คลื่นน้ำ คลื่นในเส้นเชือก คลื่นเสียง และคลื่นแผ่นดินไหว

4 สมบัติสำคัญของคลื่นที่เราจะได้เรียน

- **การสะท้อน (Reflection):** คลื่นกระดอนกลับเมื่อชนสิ่งกีดขวาง
- **การหักเห (Refraction):** คลื่นเปลี่ยนทิศและอัตราเร็วเมื่อเปลี่ยนตัวกลาง
- **การแทรกสอด (Interference):** คลื่นสองขบวนซ้อนทับเสริมหรือหักล้างกัน
- **การเลี้ยวเบน (Diffraction):** คลื่นแผ่อ้อมสิ่งกีดขวางหรือผ่านช่องแคบ

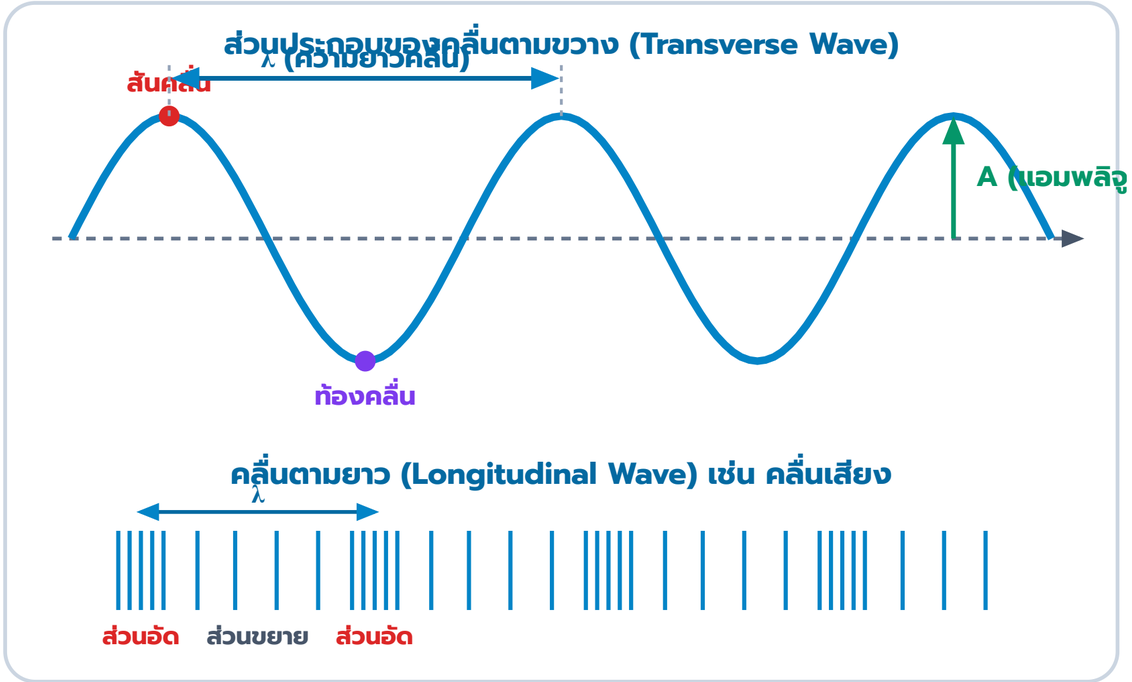
การจำแนกชนิดของคลื่นและส่วนประกอบของคลื่น

เกณฑ์การจำแนกคลื่น 2 แบบ

- **ตามการใช้ตัวกลาง: คลื่นกล** (ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น น้ำ, เชือก, เสียง) vs **คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า** (ไม่ต้องอาศัยตัวกลาง เช่น แสง, วิทยุ)
- **ตามทิศการสั่นของอนุภาค: คลื่นตามขวาง** (สั่นตั้งฉากกับทิศคลื่น) vs **คลื่นตามยาว** (สั่นแนวเดียวกับทิศคลื่น)

องค์ประกอบสำคัญของคลื่น

- **สันคลื่น / ท้องคลื่น:** ตำแหน่งการกระจัดสูงสุดทางบวก / ลบ
- **แอมพลิจูด (A):** ขนาดการกระจัดสูงสุด (บอก**พลังงาน**คลื่น)
- **ความยาวคลื่น (λ):** ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ครบ 1 รอบ (เช่น จากสันคลื่นถึงสันคลื่นถัดไป)



อัตราเร็วคลื่น ($v = f\lambda$) และความต่างเฟส ($\Delta\phi$)

อัตราเร็วคลื่นและตัวแปรที่ควบคุม

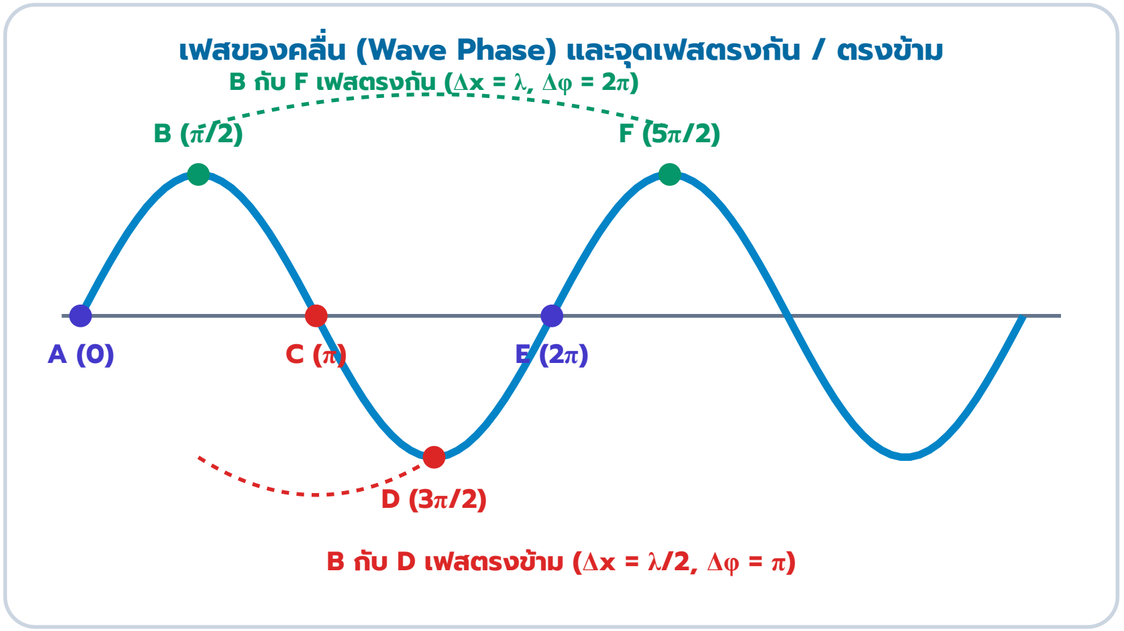
$$v = f\lambda = \frac{\lambda}{T} \qquad v_{\text{เชือก}} = \sqrt{\frac{T_{\text{ตึง}}}{\mu}}$$

- **ความถี่ (f)** ขึ้นกับ**แหล่งกำเนิดคลื่น**เท่านั้น
- **อัตราเร็ว (v)** ขึ้นกับ**สมบัติของตัวกลาง**เท่านั้น

ความต่างเฟสระหว่างสองตำแหน่ง / สองเวลา

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x = \frac{2\pi}{T}\Delta t = 2\pi f \Delta t$$

- **เฟสตรงกัน (In-phase):** $\Delta\phi = 2n\pi$ ($\Delta x = n\lambda$)
- **เฟสตรงข้าม (Out-of-phase):** $\Delta\phi = (2n-1)\pi$ ($\Delta x = \frac{(2n-1)\lambda}{2}$)



โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: อัตราเร็วคลื่น ($v = f\lambda$) และความต่างเฟส

ข้อที่ 2.1: หาอัตราเร็วคลื่นจากสันคลื่น

เชือกเส้นหนึ่งสะบัดด้วยความถี่ $5\ \text{Hz}$ เกิดคลื่นต่อเนื่อง โดยระยะห่างระหว่าง**สันคลื่นที่ 1 ถึงสันคลื่นที่ 5** วัดได้ $2.4\ \text{m}$ จงหาความยาวคลื่นและอัตราเร็วคลื่น

1) สันที่ 1 ถึงสันที่ 5 ห่างกัน $5 - 1 = 4$ ช่วงความยาวคลื่น (4λ)

$4\lambda = 2.4\ \text{m} \Rightarrow \lambda = \mathbf{0.6}\ \text{m}$

2) อัตราเร็วคลื่น: $v = f\lambda = 5 \times 0.6 = \mathbf{3.0}\ \text{m/s}$

ข้อที่ 2.2: ความต่างเฟสตามตำแหน่งและเวลา

คลื่นขบวนหนึ่งมีความยาวคลื่น $40\ \text{cm}$ และอัตราเร็ว $2\ \text{m/s}$
ก) จุดสองจุดที่ห่างกัน $10\ \text{cm}$ มีเฟสต่างกันกี่เรเดียน?
ข) ณ จุดเดิม เมื่อเวลาผ่านไป $0.1\ \text{s}$ เฟสเปลี่ยนไปกี่องศา?

ก) $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x = \frac{2\pi}{40}(10) = \frac{\pi}{\mathbf{2}}\ \text{rad}\ (90^\circ)$

ข) หาคาบจาก $T = \frac{\lambda}{v} = \frac{0.4}{2} = 0.2\ \text{s}$

$\Delta\phi = \frac{360^\circ}{T}\Delta t = \frac{360^\circ}{0.2}(0.1) = \mathbf{180}^\circ$ (เฟสตรงข้าม)

สมบัติของคลื่น (1): การสะท้อน (Reflection)

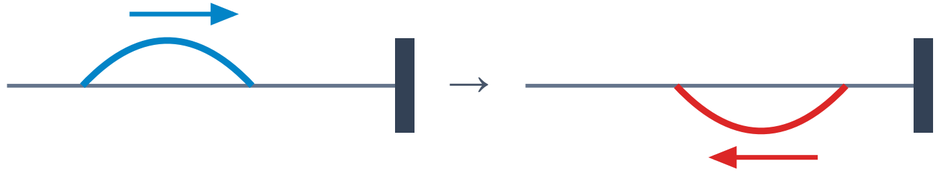
กฎการสะท้อนของคลื่น

- รังสีตกกระทบ เส้นแนวฉาก และรังสีสะท้อน อยู่ในระนาบเดียวกัน
- **มุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน** ($\theta_i = \theta_r$)
- ตัวกลางเดิม ทำให้ค่า f, v, λ **หลังสะท้อนเท่าเดิมทั้งหมด**

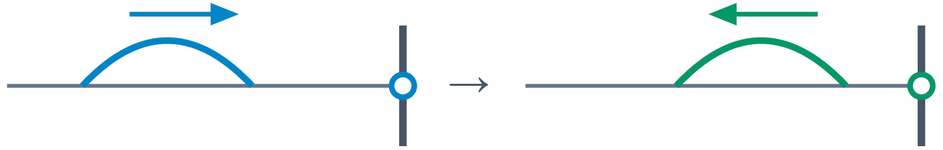
การสะท้อนของคลื่นในเส้นเชือก

- **ปลายตรึงแน่น (Fixed End):** แรงปฏิกิริยาดึงกลับทิศ ทำให้คลื่นสะท้อน**มีเฟสเปลี่ยนไป** 180° **(π rad)** หรือกลับด้าน
- **ปลายอิสระ (Free End):** ปลายเชือกขยับขึ้นลงได้อย่างอิสระ คลื่นสะท้อน**มีเฟสคงเดิม** (ไม่กลับด้าน)
- **รอยต่อเชือก:** เชือกเบาไปหนัก = เหมือนปลายตรึง (กลับเฟส)

1. ปลายตรึงแน่น (Fixed End) → คลื่นสะท้อนเฟสเปลี่ยน 180° (กลับหัว)



2. ปลายอิสระ (Free End) → คลื่นสะท้อนเฟสคงเดิม (ไม่กลับหัว)



สมบัติของคลื่น (2): การหักเห (Refraction)

กฎของสเนลล์ (Snell's Law) สำหรับคลื่น

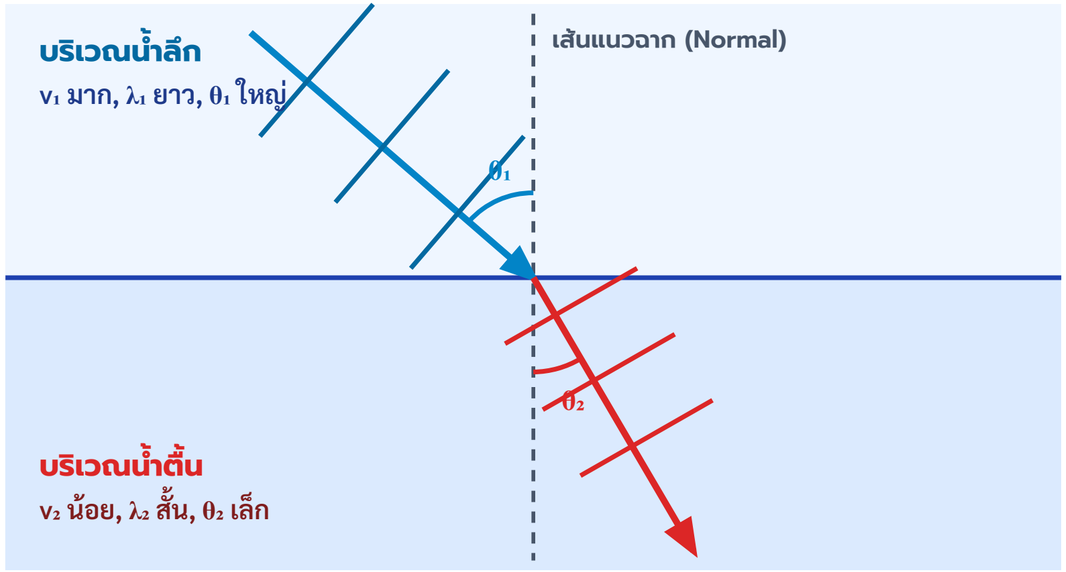
เกิดเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อระหว่างตัวกลางที่มีความลึกหรือสมบัติต่างกัน ทำให้ v **และ** λ **เปลี่ยน แต่** f **คงตัว**

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

คลื่นน้ำลึก vs คลื่นน้ำตื้น

- **น้ำลึก → น้ำตื้น:** v ลดลง, λ สั้นลง, รังสีเบน**เข้าหาเส้นแนวฉาก** ($\theta_2 < \theta_1$)
- **น้ำตื้น → น้ำลึก:** v เพิ่มขึ้น, λ ยาวขึ้น, รังสีเบน**ออกจากเส้นแนวฉาก** ($\theta_2 > \theta_1$)
- **มุมวิกฤต (θ_c):** เกิดจากน้ำตื้นไปน้ำลึกเมื่อ $\theta_2 = 90^\circ$ ได้ $\sin\theta_c = \frac{v_{ตื้น}}{v_{ลึก}}$

ความถี่ f คงตัวเสมอเมื่อคลื่นเปลี่ยนตัวกลาง



โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: การสะท้อนและการหักเหของคลื่น

ข้อที่ 2.3: การหักเหของคลื่นน้ำลึกสู่ตื้น

คลื่นผิวน้ำเคลื่อนที่จากบริเวณน้ำลึกสู่น้ำตื้น หน้าคลื่นตกกระทบทำมุม 53° และหน้าคลื่นหักเหทำมุม 37° กับแนวรอยต่อ ถ้าอัตราเร็วในน้ำลึก $20\ \text{cm/s}$ และความถี่ $5\ \text{Hz}$ จงหา v_2 และ λ_2

1) กฎของสเนลล์: $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{\sin 53^\circ}{\sin 37^\circ} = \frac{20}{v_2}$

$\frac{4/5}{3/5} = \frac{20}{v_2} \Rightarrow v_2 = \mathbf{15}\ \text{cm/s}$

2) ความถี่คงตัว $f = 5\ \text{Hz}$: $\lambda_2 = \frac{v_2}{f} = \frac{15}{5} = \mathbf{3}\ \text{cm}$

ข้อที่ 2.4: มุมวิกฤตของคลื่นน้ำและสะท้อนกลับหมด

คลื่นผิวน้ำความถี่คงตัวมีความยาวคลื่นในน้ำตื้น $3\ \text{cm}$ และในน้ำลึก $6\ \text{cm}$ จงหามุมวิกฤตเมื่อคลื่นเคลื่อนที่จากน้ำตื้นไปน้ำลึก

แนวคิด: มุมวิกฤตเกิดเมื่อคลื่นเดินทางจาก v น้อย (น้ำตื้น) ไป v มาก (น้ำลึก) โดย $\theta_2 = 90^\circ$

1) $\frac{\sin\theta_c}{\sin 90^\circ} = \frac{\lambda_{\text{ตื้น}}}{\lambda_{\text{ลึก}}} = \frac{3}{6} = 0.5$

2) ดังนั้น $\sin\theta_c = 0.5 \Rightarrow \theta_c = \mathbf{30}^\circ$ (ถ้าตกกระทบมากกว่า 30° จะสะท้อนกลับหมด)

สมบัติของคลื่น (3): การแทรกสอด (Interference)

หลักการซ้อนทับ (Superposition Principle)

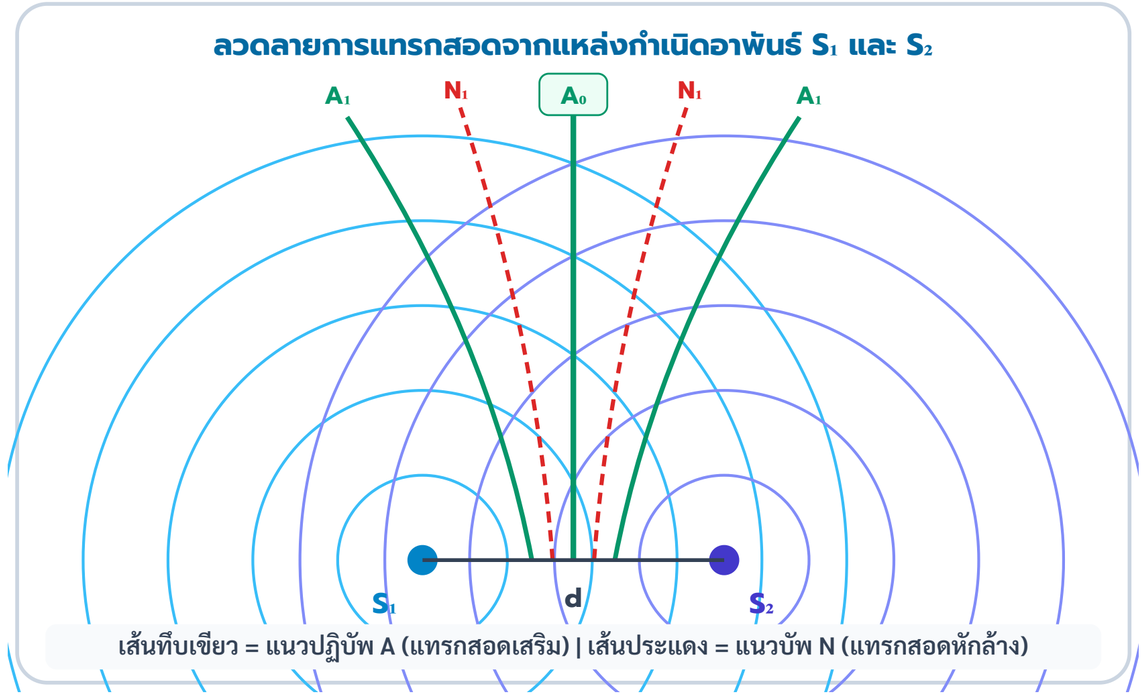
- เมื่อคลื่นสองขบวนมาพบกัน การกระจัดลัพธ์เท่ากับผลบวกทางพีชคณิตของการกระจัดแต่ละคลื่น แล้วเคลื่อนที่ผ่านกันไปตามเดิม
- **แหล่งกำเนิดอาพันธ์ (Coherent):** ความถี่เท่ากัน และมีความต่างเฟสคงตัว

สูตรแนวปฏิบัพและแนวบัพ (กรณีแหล่งกำเนิดเฟสตรงกัน)

$$\text{แนวปฏิบัพ } (A_n): \quad |S_1P - S_2P| = d\sin\theta = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\text{แนวบัพ } (N_n): \quad |S_1P - S_2P| = d\sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

*หมายเหตุ: หากแหล่งกำเนิดมี**เฟสตรงข้ามกัน** สูตรของแนวปฏิบัพและแนวบัพจะสลับกัน



โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: การแทรกสอดจากแหล่งกำเนิดอาพันธ์คู่

ข้อที่ 2.5: ระบุตำแหน่งแนวบัพ/ปฏิบัพ

แหล่งกำเนิดอาพันธ์เฟสตรงกัน S_1, S_2 ให้คลื่น $\lambda = 2$ cm จุด P อยู่ห่างจาก S_1 และ S_2 เป็นระยะ 10 cm และ 15 cm ตามลำดับ จุด P อยู่บนแนวใด?

1) หาผลต่างระยะทาง: $|S_1P - S_2P| = |10 - 15| = 5$ cm

2) เทียบกับ λ: $\frac{|S_1P - S_2P|}{\lambda} = \frac{5}{2} = 2.5$ (ลงท้าย .5 คือแนวบัพ)

3) จาก $(n - \frac{1}{2}) = 2.5 \Rightarrow n = 3$ ดังนั้นอยู่บน **แนวบัพที่ 3 (N_3)**

ข้อที่ 2.6: นับจำนวนแนวปฏิบัพทั้งหมดระหว่าง S_1, S_2

แหล่งกำเนิดอาพันธ์เฟสตรงกัน S_1, S_2 อยู่ห่างกัน 11 cm ให้คลื่นความยาวคลื่น 4 cm ระหว่าง S_1 และ S_2 จะเกิด**แนวปฏิบัพทั้งหมดกี่แนว**?

1) ขอบเขตสูงสุดเมื่อ $\sin\theta \leq 1$: $d\sin\theta = n\lambda \Rightarrow n_{\max} \leq \frac{d}{\lambda}$

2) $n_{\max} = \lfloor \frac{11}{4} \rfloor = \lfloor 2.75 \rfloor = 2$ (ซ้าย 2 แนว, ขวา 2 แนว)

3) รวมแนวกลาง A_0: จำนวนแนวปฏิบัพทั้งหมด $= 2n_{\max} + 1 = 2(2) + 1 = $ **5 แนว**

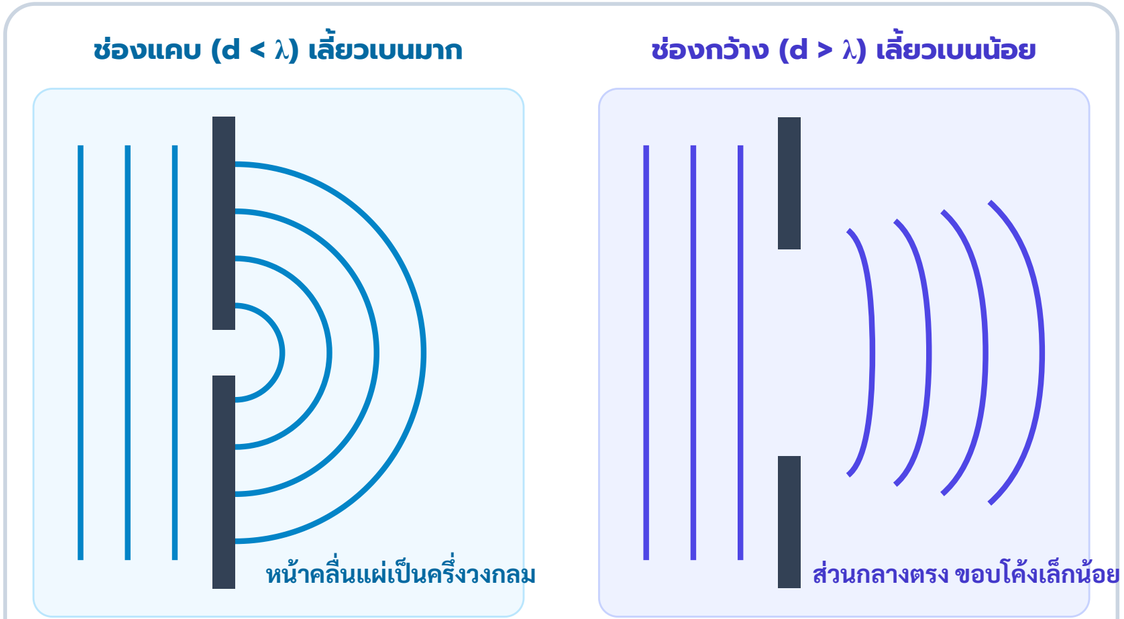
สมบัติของคลื่น (4): การเลี้ยวเบน (Diffraction)

หลักการของฮอยเกนส์ (Huygens' Principle)

- ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นสามารถทำหน้าที่เป็น**แหล่งกำเนิดคลื่นจุดใหม่**ที่แผ่หน้าคลื่นวงกลมออกไปข้างหน้าด้วยอัตราเร็วเดิม
- หน้าคลื่นใหม่คือแนวเส้นสัมผัสของคลื่นย่อยเหล่านั้น ทำให้คลื่นสามารถ**แผ่อ้อมหลังสิ่งกีดขวาง**ได้

เงื่อนไขความชัดเจนของการเลี้ยวเบน

- **ช่องเปิดแคบ ($d < \lambda$ หรือ $d \approx \lambda$):** เลี้ยวเบนได้ชัดเจน หน้าคลื่นหลังช่องแผ่เป็นครึ่งวงกลม
- **ช่องเปิดกว้าง ($d \gg \lambda$):** คลื่นเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงกลางช่อง และโค้งเฉพาะขอบ
- **ตัวอย่าง:** เราได้ยินเสียงคนพูดหลังกำแพง เพราะคลื่นเสียงมี λ ยาวระดับเมตร จึงเลี้ยวเบนอ้อมมุมตึกได้ดีกว่าแสง



คลื่นนิ่ง (Standing Waves) และความถี่ฮาร์มอนิกในเส้นเชือก

การเกิดคลื่นนิ่ง

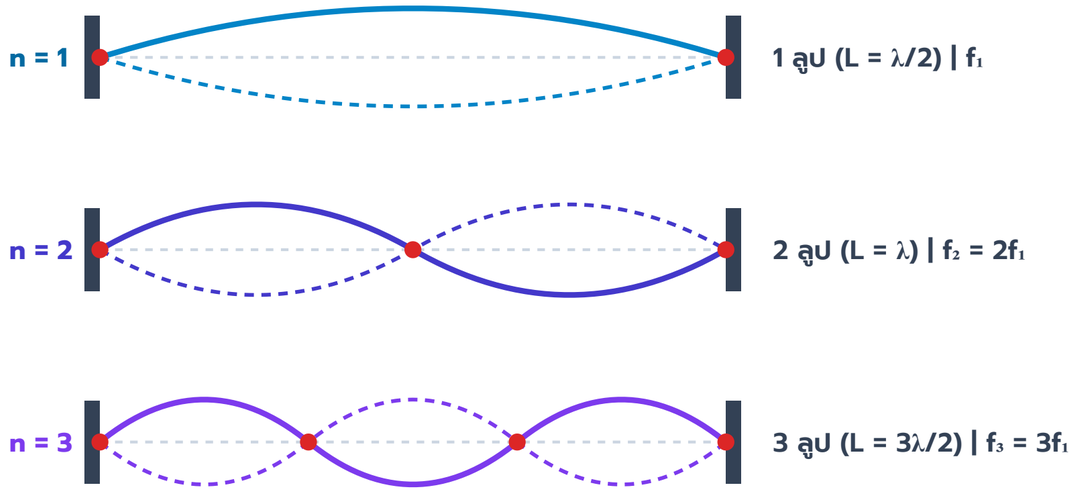
- เกิดจากคลื่น 2 ขบวนที่มี**แอมพลิจูด ความถี่ และอัตราเร็วเท่ากัน** เคลื่อนที่สวนทางกันมาแทรกสอด
- **บัพ (Node, N):** จุดที่หยุดนิ่งตลอดเวลา
- **ปฏิบัพ (Antinode, A):** จุดที่สั่นด้วยแอมพลิจูดสูงสุด $(2A)$
- ระยะระหว่างบัพติดกัน (1 ลูป) = ระยะระหว่างปฏิบัพติดกัน = $\frac{\lambda}{2}$

ความถี่การสั่นพ้องในเชือกขึงตึงยาว L

$$L = n\frac{\lambda_n}{2} \qquad \text{และ} \qquad f_n = \frac{nv}{2L} = nf_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

เมื่อ n คือจำนวนลูป (ฮาร์มอนิกที่ n) และ $f_1 = \frac{v}{2L}$ คือความถี่มูลฐาน

คลื่นนิ่งในเส้นเชือกปลายตรึงทั้งสองข้าง (ความยาว L)



จุดสีแดง = บัพ (Node, N) | ยอดลูป = ปฏิบัพ (Antinode, A)

โจทย์ฝึกทำท้ายบทที่ 2: การเลี้ยวเบนและคลื่นนิ่งในเส้นเชือก

ข้อที่ 2.7: คลื่นนิ่งในเส้นเชือกขึงตึง

เชือกยาว $1.2\ \text{m}$ ตรึงปลายทั้งสองข้าง สั่นด้วยความถี่ $60\ \text{Hz}$ พบว่าเกิดคลื่นนิ่งมี **3 ลูป** (4 บัพ) จงหาอัตราเร็วคลื่นในเชือกและความถี่มูลฐาน (f_1)

1) 3 ลูป ($n = 3$): $L = 3\frac{\lambda}{2} \Rightarrow 1.2 = 1.5\lambda \Rightarrow \lambda = 0.8\ \text{m}$

2) อัตราเร็วคลื่น: $v = f\lambda = 60 \times 0.8 = \mathbf{48}\ \text{m/s}$

3) ความถี่มูลฐาน: $f_1 = \frac{f_3}{3} = \frac{60}{3} = \mathbf{20}\ \text{Hz}$

ข้อที่ 2.8: แนวบัพจากการเลี้ยวเบนและแรงตึงเชือก

สายกีตาร์มวลต่อหน่วยความยาว $0.004\ \text{kg/m}$ ขึงตึงด้วยแรง $100\ \text{N}$ ยาว $0.5\ \text{m}$ เมื่อดีดให้สั่นที่ฮาร์มอนิกที่ 2 จะเกิดเสียงความถี่กี่เฮิรตซ์?

1) อัตราเร็วคลื่นในสาย: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} = \sqrt{\frac{100}{0.004}} = \sqrt{25,000} = 50\sqrt{10} \approx 158.1\ \text{m/s}$

2) ฮาร์มอนิกที่ 2 ($n = 2$): $f_2 = \frac{2v}{2L} = \frac{v}{L} = \frac{50\sqrt{10}}{0.5} = \mathbf{100\sqrt{10}}\ \text{Hz} \approx 316.2\ \text{Hz}$

บทที่ 3: การทดลองใดที่พิสูจน์ว่า 'แสงมีสมบัติเป็นคลื่น'?

คำถามชวนคิด

“เหตุใดเมื่อแสงผ่านช่องเปิดแคบๆ สองช่อง แทนที่จะปรากฏเป็นเส้นสว่างเพียง 2 เส้นบนฉาก กลับเกิดเป็นแถบสว่างสลับแถบมืดเรียงตัวกันหลายแถบ?”

ความยาวคลื่นแสงที่มองเห็น

400 nm (ม่วง) ถึง 700 nm (แดง) มีขนาดเล็กมากระดับนาโนเมตร

การเลี้ยวเบนและแทรกสอด

เกิดชัดเจนเมื่อช่องเปิดแคบมากระดับไมโครเมตร (μm)

สีรุ้งจากคลื่นแสง

พบได้ในแผ่นซีดี เกรตติง คราบน้ำมัน และฟองสบู่

หัวข้อสำคัญในบทแสงเชิงคลื่น

- **สลิตคู่ของยัง (Young's Double Slit):** พิสูจน์การแทรกสอดของแสง
- **สลิตเดี่ยว (Single Slit):** พิสูจน์การเลี้ยวเบนของแสง
- **เกรตติง (Diffraction Grating):** ช่องสลิตจำนวนมาก แยกสเปกตรัมแสงคมชัด
- **การกระเจิงของแสง (Scattering):** อธิบายท้องฟ้าสีครามและอาทิตย์อัสดง

การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่ (Young's Double Slit)

หลักการทดลองของโธมัส ยัง

- ใช้แหล่งกำเนิดแสงสีเดียวความยาวคลื่น λ ผ่านช่องคู่ห่างกัน d ไปตกบนฉากที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะ L (โดย $L \gg d$)
- เกิดแถบสว่างสลับแถบมืดที่มี**ความกว้างเท่ากันสม่ำเสมอ**

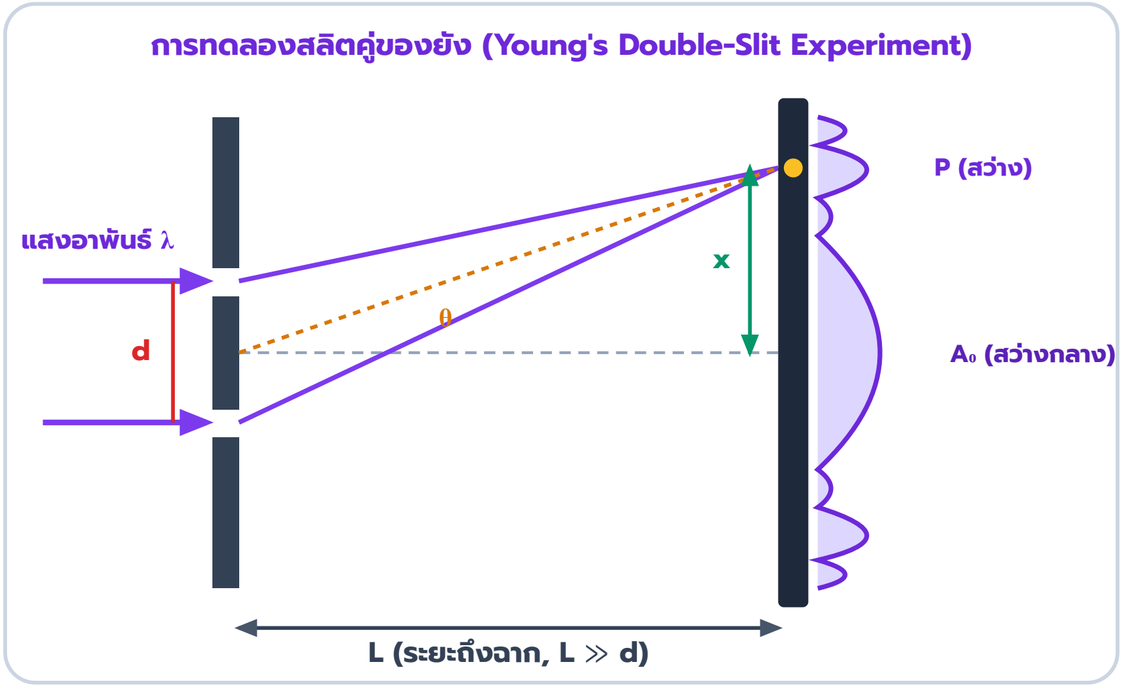
$$\text{แถบสว่าง } (A_n): \quad d\sin\theta \approx d\frac{x}{L} = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$\text{แถบมืด } (N_n): \quad d\sin\theta \approx d\frac{x}{L} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

ระยะห่างระหว่างแถบที่อยู่ติดกัน (Δx)

ระยะห่างระหว่างแถบสว่างติดกัน (หรือแถบมืดติดกัน) มีค่าคงตัว:

$$\Delta x = \frac{\lambda L}{d}$$



โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: การแทรกสอดของแสงผ่านสลิตคู่ของยัง

ข้อที่ 3.1: หาระยะห่างแถบสว่างสลิตคู่

ฉายแสงความยาวคลื่น $600\ \text{nm}$ ผ่านสลิตคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่อง $0.2\ \text{mm}$ ไปตกบนฉากที่อยู่ห่าง $2\ \text{m}$ จงหาระยะห่างระหว่าง **แถบสว่างกลางถึงแถบสว่างที่ 3**

1) ระยะห่างระหว่างแถบสว่างติดกัน: $\Delta x = \frac{\lambda L}{d} = \frac{(600\times10^{-9})(2)}{0.2\times10^{-3}} = 6\times10^{-3}\ \text{m} = 6\ \text{mm}$

2) จากแนวกลาง ($n=0$) ถึงแถบสว่างที่ 3 ($n=3$) ห่างเท่ากับ $3\Delta x$

ระยะบนฉาก: $x_3 = 3\times 6\ \text{mm} = \mathbf{18}\ \text{mm} = 1.8\ \text{cm}$

ข้อที่ 3.2: หาความยาวคลื่นจากแถบมืดสลิตคู่

สลิตคู่มีระยะห่างระหว่างช่อง $0.3\ \text{mm}$ ฉากห่าง $1.5\ \text{m}$ พบว่า**แถบมืดที่ 2** อยู่ห่างจากแถบสว่างกลาง $4.5\ \text{mm}$ แสงที่ใช้มีความยาวคลื่นกี่นาโนเมตร?

1) แถบมืดสลิตคู่ ($n=2$): $d\frac{x}{L} = \left(n-\frac{1}{2}\right)\lambda = 1.5\lambda$

2) แทนค่า: $(0.3\times10^{-3})\left(\frac{4.5\times10^{-3}}{1.5}\right) = 1.5\lambda \Rightarrow 9\times10^{-7} = 1.5\lambda$

3) $\lambda = 6\times10^{-7}\ \text{m} = \mathbf{600}\ \text{nm}$ (แสงสีส้ม-เหลือง)

การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว (Single-Slit Diffraction)

ลักษณะแถบเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบกว้าง a

- **แถบสว่างกลาง (A_0)** สว่างที่สุดและ**กว้างเป็น 2 เท่า**ของแถบสว่างด้านข้าง
- ความเข้มของแถบสว่างด้านข้างจะลดลงอย่างรวดเร็ว
- ระวัง! **สมการของสลิตเดี่ยวจะสลับกับสลิตคู่**

$$\text{แถบมืด } (N_n): \quad a\sin\theta \approx a\frac{x}{L} = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

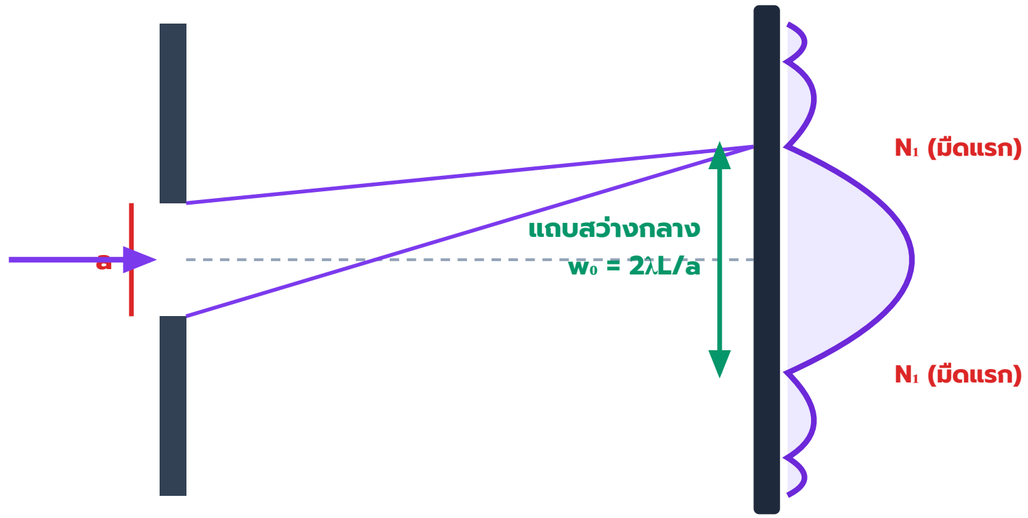
$$\text{แถบสว่างด้านข้าง } (A_n): \quad a\sin\theta \approx a\frac{x}{L} = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

ความกว้างของแถบสว่างกลาง (w_0)

$$w_0 = 2x_{N_1} = \frac{2\lambda L}{a}$$

ช่องสลิตยิ่งแคบ (a น้อย) แถบสว่างกลางจะยิ่งบานกว้างขึ้น

การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว (Single-Slit Diffraction)



แถบสว่างกลางกว้างเป็น 2 เท่าของแถบสว่างด้านข้าง และสว่างมากที่สุด

โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: การเลี้ยวเบนของแสงผ่านสลิตเดี่ยว

ข้อที่ 3.3: ความกว้างแถบสว่างกลางสลิตเดี่ยว

ฉายแสงความยาวคลื่น $500\ \text{nm}$ ผ่านสลิตเดี่ยวกว้าง $0.1\ \text{mm}$ ไปตกบนฉากห่าง $2\ \text{m}$ จงหา**ความกว้างของแถบสว่างกลาง**บนฉาก

แนวคิด: ความกว้างแถบสว่างกลางคือระยะระหว่างแถบมืดที่ 1 (N_1) ทั้งสองข้าง

1) สูตรสลิตเดี่ยว: $w_0 = 2x_{N_1} = \frac{2\lambda L}{a}$

2) $w_0 = \frac{2(500\times10^{-9})(2)}{0.1\times10^{-3}} = 20\times10^{-3}\ \text{m} = \mathbf{20}\ \text{mm} = 2.0\ \text{cm}$

ข้อที่ 3.4: หาความกว้างช่องสลิตเดี่ยวจากมุมเบน

แสงความยาวคลื่น $600\ \text{nm}$ ตกตั้งฉากผ่านสลิตเดี่ยว เกิดแถบมืดอันดับที่ 2 เบนจากแนวกลางเป็นมุม 30° จงหาความกว้างของช่องสลิตเดี่ยวนี้ในหน่วยไมโครเมตร (μm)

1) แถบมืดสลิตเดี่ยว ($n = 2$): $a\sin\theta = n\lambda$

2) $a\sin 30^\circ = 2(600\times10^{-9}) \Rightarrow a(0.5) = 1.2\times10^{-6}\ \text{m}$

3) ความกว้างช่องสลิต: $a = 2.4\times10^{-6}\ \text{m} = \mathbf{2.4}\ \mu\text{m}$

เกรตติงเลี้ยวเบน (Diffraction Grating) และการแยกสเปกตรัม

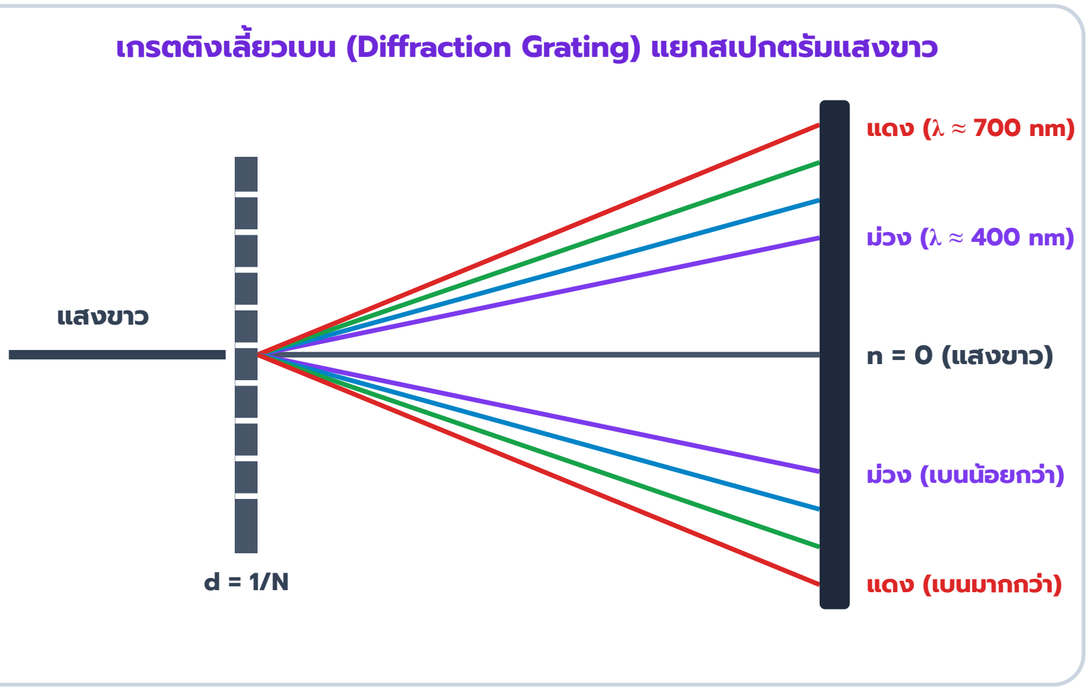
โครงสร้างและสมการเกรตติง

- แผ่นใสที่มีร่องขนานจำนวนมาก (เช่น 5,000 ช่องต่อ cm) ให้แถบสว่างที่**แคบ คมชัด และห่างกันมาก**
- ระยะห่างระหว่างช่อง (d) หาจากส่วนกลับของจำนวนช่องต่อความยาว (N):

$$d = \frac{1}{N} \qquad \text{และแถบสว่าง: } d\sin\theta = n\lambda$$

การแยกสเปกตรัมแสงขาวและจำนวนแถบสูงสุด

- **สเปกตรัมแสงขาว:** แสงสีม่วง (λ สั้น) เบนน้อยสุด ส่วน**แสงสีแดง (λ ยาว) เบนมากสุด**
- **จำนวนแถบสว่างสูงสุด:** เนื่องจาก $\sin\theta \le 1$ จึงได้ว่า $n_{\max} = \lfloor \frac{d}{\lambda} \rfloor$
- จำนวนแถบสว่าง**ทั้งหมด**บนฉาก $= 2n_{\max} + 1$ (รวมแนวกลาง $n = 0$)



ตารางเปรียบเทียบ: สลิตคู่ vs สลิตเดี่ยว vs เกรตติง

หัวข้อเปรียบเทียบ	สลิตคู่ (Double Slit)	สลิตเดี่ยว (Single Slit)	เกรตติง (Grating)
พารามิเตอร์ช่องเปิด	d (ระยะห่างระหว่าง 2 ช่อง)	a (ความกว้างของ 1 ช่อง)	$d = \frac{1}{N}$ (ระยะระหว่างร่อง)
สมการแถบสว่าง	$d\sin\theta = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$	$a\sin\theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 1, 2, \dots)$	$d\sin\theta = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$
สมการแถบมืด	$d\sin\theta = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (n = 1, 2, \dots)$	$a\sin\theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, \dots)$	ไม่นิยมคำนวณแถบมืด
ลักษณะแถบสว่างบนฉาก	สว่างใกล้เคียงกันและกว้างเท่ากัน	**แถบกลางกว้างเป็น 2 เท่า**และสว่างสุด	เส้นสว่าง**แคบ คมชัด มุมเบนกว้าง**
สูตรลัดมุมเล็ก ($L \gg x$)	$\Delta x = \frac{\lambda L}{d}$	$w_{\text{กลาง}} = \frac{2\lambda L}{a}$	ห้ามประมาณ $\sin\theta \approx \frac{x}{L}$ (มุมมักใหญ่)

ทริคจำไม่สับสน: “คู่-เกรตติง ใช้ $n\lambda$ หา**สว่าง**” ส่วน “เดี่ยว ใช้ $n\lambda$ หา**มืด**” และเกรตติงใช้ $d\sin\theta = n\lambda$ ตรงๆ ห้ามประมาณมุมเล็ก!

การกระเจิงของแสง (Scattering) และปรากฏการณ์ในธรรมชาติ

01 · การกระเจิงแบบเรย์ลี

Rayleigh Scattering

- เกิดกับอนุภาคขนาด**เล็กกว่า** λ **แสง** (เช่น โมเลกุลแก๊ส N_2, O_2 ในบรรยากาศ)
- ความเข้มกระเจิงแปรผกผันกับ λ^4 ($I \propto \frac{1}{\lambda^4}$)
- แสงสีน้ำเงิน (λ สั้น) กระเจิงมากที่สุด $\rightarrow$ **ท้องฟ้ากลางวันเป็นสีฟ้า**
- ยามเย็นแสงเดินทางไกล $\rightarrow$ เหลือสีส้มแดง

02 · การกระเจิงแบบมี

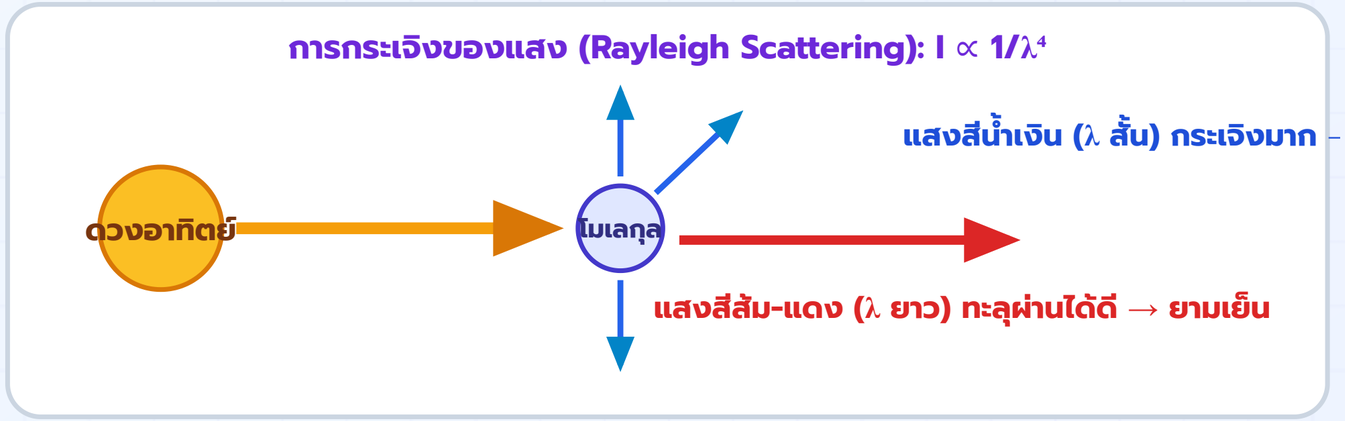
Mie Scattering

- เกิดกับอนุภาคขนาด**ใกล้เคียงหรือใหญ่กว่า** λ (เช่น หยดน้ำในก้อนเมฆ, ฝุ่น PM2.5)
- แสงทุกสีกระเจิงได้ดีพอๆ กัน ไม่เลือก λ
- ทำให้เห็น **ก้อนเมฆและหมอกเป็นสีขาว** หรือฟ้าขุ่นขาวเมื่อฝุ่นหนาแน่น

03 · การแทรกสอดในฟิล์มบาง

Thin-Film Interference

- แสงสะท้อนจากผิวบนและผิวล่างของฟิล์มบางมา**แทรกสอดกัน**
- เกิดสีรุ้งบนฟองสบู่ คราบน้ำมัน และปีกแมลงทับ
- ประยุกต์ทำ **สารเคลือบเลนส์ลดแสงสะท้อน** (Anti-reflective coating)



โจทย์ฝึกทำท้ายบทที่ 3: เกรตติงเลี้ยวเบนและการเปรียบเทียบสลิต

ข้อที่ 3.5: เกรตติงหาจำนวนแถบสว่างทั้งหมด

เกรตติงมีจำนวน $5,000$ **ช่อง**$/\text{cm}$ ฉายแสงความยาวคลื่น $500\ \text{nm}$ ตกตั้งฉาก จงหามุมเบนแถบสว่างที่ 1 และ**จำนวนแถบสว่างทั้งหมด**ที่เห็นบนฉาก

1) หาระยะห่างช่อง: $d = \frac{10^{-2}\ \text{m}}{5,000} = 2 \times 10^{-6}\ \text{m}$

2) อันดับ 1 ($n = 1$): $\sin\theta_1 = \frac{500 \times 10^{-9}}{2 \times 10^{-6}} = 0.25 \Rightarrow \theta_1 \approx \mathbf{14.5}^\circ$

3) อันดับสูงสุด: $\sin\theta < 1 \Rightarrow n < \frac{d}{\lambda} = \frac{2000\ \text{nm}}{500\ \text{nm}} = 4 \Rightarrow n_{\max} = 3$

รวมจำนวนแถบสว่างบนฉาก: $2(3) + 1 = \mathbf{7}$ **แถบ** (ไม่นับ $\theta = 90^\circ$)

ข้อที่ 3.6: การวัดความยาวคลื่นที่ไม่ทราบค่าด้วยเกรตติง

แสงสีแดง $\lambda_1 = 640\ \text{nm}$ ผ่านเกรตติงเกิดแถบสว่างอันดับที่ 2 ทับตำแหน่งเดียวกับแถบสว่างอันดับที่ 3 ของแสงสีปริศนา λ_2 พอดี จงหา λ_2 และระบุสีของแสง

แนวคิด: ทับตำแหน่งเดียวกันแสดงว่ามุม θ เท่ากัน จาก $d\sin\theta = n\lambda$

1) $n_1\lambda_1 = n_2\lambda_2 \Rightarrow 2(640) = 3\lambda_2$

2) $\lambda_2 = \frac{1280}{3} \approx \mathbf{426.7}\ \text{nm}$ (อยู่ในย่าน **แสงสีม่วง-น้ำเงิน**)

บทที่ 4: กระจก เลนส์ และเส้นใยนำแสงควบคุมทิศทางแสงได้อย่างไร?

คำถามชวนคิด

“เมื่อช่องเปิดหรืออุปกรณ์มีขนาดใหญ่กว่าความยาวคลื่นแสงมาก แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง—เราจะใช้กระจกและเลนส์สร้างภาพและส่งข้อมูลอินเทอร์เน็ตด้วยแสงได้อย่างไร?”

แบบจำลองรังสีแสง (Ray)
เขียนเส้นตรงพร้อมลูกศรแทนทิศการเคลื่อนที่ของพลังงานแสง

ภาพจริง vs ภาพเสมือน
แสงตัดกันจริงรับด้วยฉากได้ vs แนวเสมือนตัดกันมองผ่านตาได้

เทคโนโลยีรอบตัว
แว่นตา กล้องถ่ายรูป กล้องจุลทรรศน์ และเส้นใยนำแสง (Fiber Optic)

เส้นทางการเรียนรู้บทแสงเชิงรังสี

- **การสะท้อน:** กระจกเงาราบ กระจกเว้า และกระจกนูน
- **การหักเห:** กฎของสเนลล์ ความลึกปรากฏ และมุมวิกฤต
- **เลนส์บาง:** เลนส์นูน เลนส์เว้า และการใช้สมการกำหนดเครื่องหมาย
- **ทัศนศาสตร์ประยุกต์:** ตาและการแก้สายตา ทัศนอุปกรณ์ และความสว่าง

การสะท้อนของแสงและกระจกเงาราบ (Plane Mirror)

สมบัติของภาพในกระจกเงาราบ

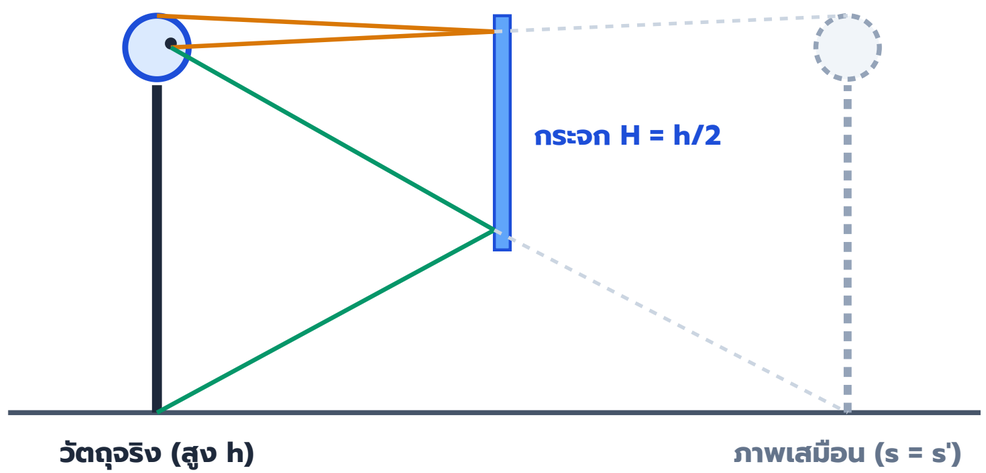
- เป็น **ภาพเสมือน** อยู่หลังกระจก **หัวตั้ง กลับซ้าย-ขวา**
- ระยะภาพเท่ากับระยะวัตถุ ($s' = s$) และขนาดเท่าวัตถุ ($h' = h$)
- หากหมุนกระจกเงาราบไปเป็นมุม α รังสีสะท้อนจะเบนไปเป็นมุม 2α

การส่องเต็มตัวและกระจก 2 บานทำมุม θ

- **ความสูงกระจกน้อยสุดที่เห็นเต็มตัว:** $H_{\min} = \frac{h}{2}$ โดยขอบล่างกระจกต้องสูงจากพื้นเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงระดับตา
- **จำนวนภาพจากกระจก 2 บานทำมุม θ:**

$$n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1 \quad (\text{เมื่อ } \frac{360^\circ}{\theta} \text{ ลงตัว})$$

การเห็นภาพเต็มตัวในกระจกเงาราบ (ความสูงกระจกน้อยสุด = h/2)



กระจกเงาโค้งทรงกลม: กระจกเว้า (Concave) และกระจกนูน (Convex)

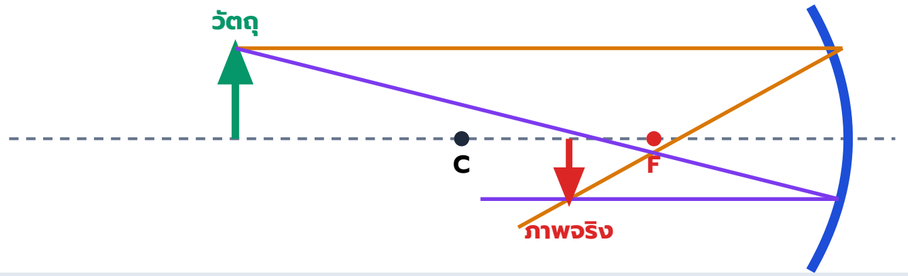
ความยาวโฟกัสและรังสีหลัก 3 เส้น

- ความยาวโฟกัสมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของรัศมีความโค้ง: $f = \frac{R}{2}$
- **รังสี 1:** ขนานแกนมุขสำคัญ $\rightarrow$ สะท้อนผ่านจุดโฟกัส F
- **รังสี 2:** ผ่านจุดโฟกัส F $\rightarrow$ สะท้อนขนานแกนมุขสำคัญ
- **รังสี 3:** ผ่านจุดศูนย์กลางความโค้ง C $\rightarrow$ สะท้อนกลับทางเดิม

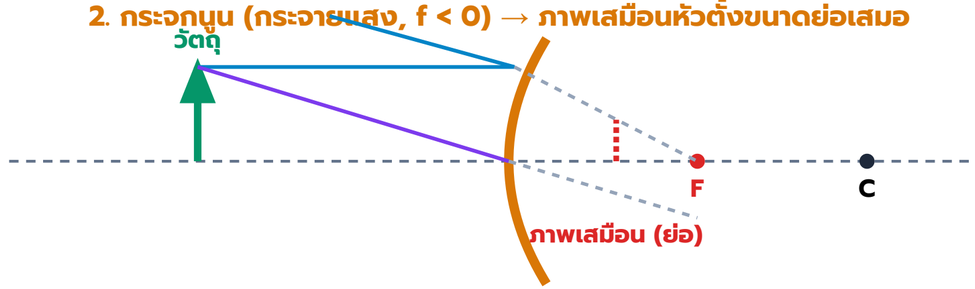
เปรียบเทียบชนิดภาพของกระจกเว้าและกระจกนูน

- **กระจกเว้า ($f > 0$, รวมแสง):** ให้**ภาพจริงหัวกลับ** (ย่อ/เท่า/ขยาย) เมื่อ $s > f$ และให้**ภาพเสมือนหัวตั้งขนาดขยาย** เมื่อ $s < f$ (ใช้ทำกระจกส่องฟัน/แต่งหน้า)
- **กระจกนูน ($f < 0$, กระจายแสง):** ให้**ภาพเสมือนหัวตั้งขนาดย่อเสมอ** เก็บมุมมองได้กว้าง (ใช้เป็นกระจกโค้งทางแยก)

1. กระจกเว้า (รวมแสง, f > 0) กรณีวัตถุอยู่หน้าจุด C → ภาพจริงหัวกลับขนาดย่อ



2. กระจกนูน (กระจายแสง, f < 0) → ภาพเสมือนหัวตั้งขนาดย่อเสมอ



โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: กระจกเงาราบและกระจกโค้งทรงกลม

ข้อที่ 4.1: กระจกเงาราบ 2 บานทำมุมกัน

ก) คนสูง $170\ \text{cm}$ ต้องการส่องกระจกเงาราบให้เห็นเต็มตัว ต้องใช้กระจกสูงน้อยที่สุดกี่เซนติเมตร?
ข) วางเทียนไขไว้ระหว่างกระจกเงาราบ 2 บานที่ทำมุมกัน 60° จะมองเห็นภาพเทียนไขทั้งหมดกี่ภาพ?

ก) ความสูงกระจกน้อยสุด $= \frac{h}{2} = \frac{170}{2} = \mathbf{85}\ \text{cm}$ (ไม่ขึ้นกับระยะยืน)

ข) จำนวนภาพ: $n = \frac{360^\circ}{\theta} - 1 = \frac{360^\circ}{60^\circ} - 1 = 6 - 1 = \mathbf{5}$ ภาพ

ข้อที่ 4.2: การคำนวณภาพจากกระจกโค้ง

วางวัตถุหน้ากระจกเว้าที่มีรัศมีความโค้ง $40\ \text{cm}$ เป็นระยะ $30\ \text{cm}$ จงหาตำแหน่ง ชนิดภาพ และกำลังขยาย

1) ความยาวโฟกัสกระจกเว้า ($f > 0$): $f = \frac{R}{2} = \frac{40}{2} = +20\ \text{cm}$

2) จาก $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \Rightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{30} + \frac{1}{s'} \Rightarrow \frac{1}{s'} = \frac{3-2}{60} \Rightarrow s' = +\mathbf{60}\ \text{cm}$

3) $s' > 0$ คือ**ภาพจริง หัวกลับ หน้ากระจก** $60\ \text{cm}$ | กำลังขยาย $M = \frac{60}{30} = \mathbf{2}$ เท่า

การหักเหของแสง กฎของสเนลล์ และความลึกปรากฏ

ดัชนีหักเหและกฎของสเนลล์

- **ดัชนีหักเห (n):** อัตราส่วนความเร็วแสงในสุญญากาศต่อในตัวกลาง $n = \frac{c}{v} \geq 1$ ($n_{\text{อากาศ}} \approx 1, n_{\text{น้ำ}} \approx 1.33, n_{\text{แก้ว}} \approx 1.5$)

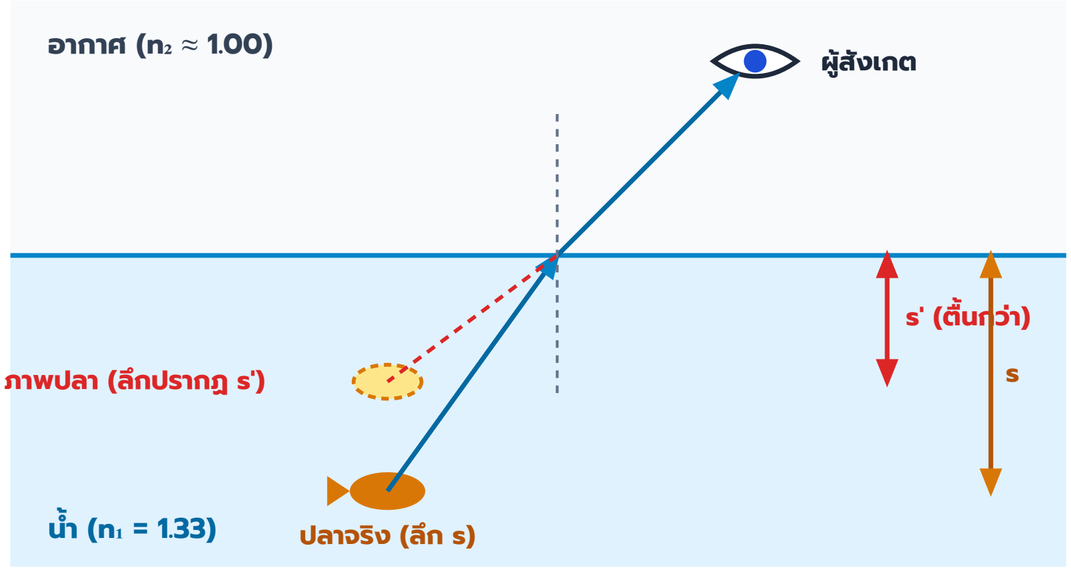
$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \qquad \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

ความลึกจริง (s) และความลึกปรากฏ (s')

เมื่อมองวัตถุข้ามรอยต่อตัวกลางในแนวเกือบตั้งฉาก:

$$\frac{s'}{s} = \frac{n_{\text{ผู้สังเกต}}}{n_{\text{วัตถุ}}} = \frac{n_2}{n_1}$$

*คนมองปลาในน้ำ ($n_2 < n_1$) เห็นปลา**ตื้นกว่าจริง** | ปลาใต้น้ำมองนก ($n_2 > n_1$) เห็นนก**สูงกว่าจริง**



มุมวิกฤต การสะท้อนกลับหมด (TIR) และรุ้งกินน้ำ

เงื่อนไขการเกิดการสะท้อนกลับหมด (TIR)

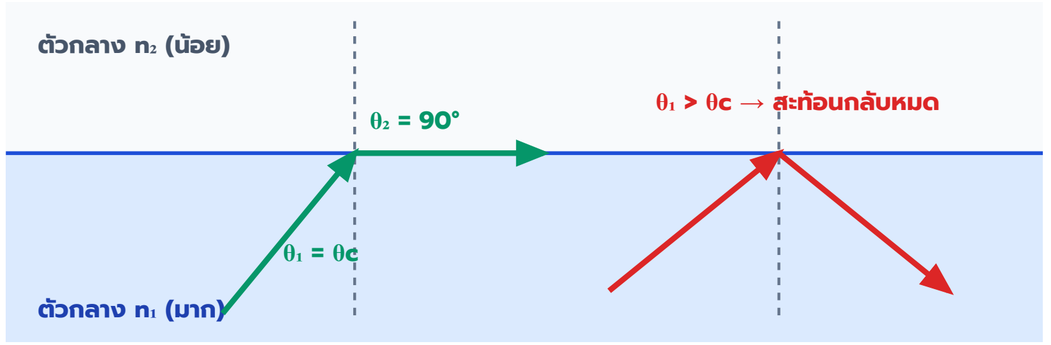
- 1) แสงต้องเดินทางจาก**ตัวกลาง n มาก ไปยัง n น้อย** ($n_1 > n_2$)
- 2) มุมตกกระทบต้อง**มากกว่ามุมวิกฤต** ($\theta_1 > \theta_c$)

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{(เมื่อมุมหักเห } \theta_2 = 90^\circ\text{)}$$

การประยุกต์และปรากฏการณ์ธรรมชาติ

- **เส้นใยนำแสง (Optical Fiber):** ส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงโดยไม่สูญเสียพลังงาน
- **เพชร ($n = 2.42$):** มี $\theta_c \approx 24.4^\circ$ น้อยมาก แสงจึงสะท้อนกลับหมดหลายครั้งเกิดประกายแวววาว
- **รุ้งกินน้ำ:** เกิดจากการ**หักเห + การกระจายแสง + สะท้อนกลับหมด** ในหยดน้ำฝน (รุ้งปฐมภูมิ สะท้อน 1 ครั้ง แดงบน-ม่วงล่าง, รุ้งทุติยภูมิสะท้อน 2 ครั้ง ม่วงบน-แดงล่าง)

มุมวิกฤต (θc) และการสะท้อนกลับหมดในเส้นใยนำแสง



เส้นใยนำแสง (Optical Fiber): Core (n_1 สูง) หุ้มด้วย Cladding (n_2 ต่ำ)



โจทย์ตัวอย่าง & ฝึกทำ: กฎสเนลล์ ความลึกปรากฏ และมุมวิกฤต

ข้อที่ 4.3: ความลึกปรากฏ (มองลงน้ำ & มองขึ้นฟ้า)

ก) เหรียญอยู่ก้นบ่อน้ำลึก $1.2\ \text{m}$ ($n_{\text{น้ำ}} = \frac{4}{3}$) มองจากอากาศจะเห็นเหรียญลึกกี่เมตร?
ข) ปลาในน้ำมองเห็นนกบินสูงเหนือผิวน้ำจริง $3\ \text{m}$ ปลาจะเห็นนกอยู่สูงจากผิวน้ำกี่เมตร?

ก) คนมองเหรียญ: $\frac{s'}{s} = \frac{n_{\text{ตา}}}{n_{\text{วัตถุ}}} = \frac{1}{4/3} = \frac{3}{4} \Rightarrow s' = \frac{3}{4}(1.2) = \mathbf{0.9}\ \text{m}$

ข) ปลามองนก: $\frac{s'}{s} = \frac{n_{\text{ตา}}}{n_{\text{วัตถุ}}} = \frac{4/3}{1} = \frac{4}{3} \Rightarrow s' = \frac{4}{3}(3) = \mathbf{4.0}\ \text{m}$

ข้อที่ 4.4: มุมวิกฤตและการหักเหในแท่งแก้ว

แสงเดินทางจากแท่งแก้ว ($n = 1.5$) ออกสู่น้ำ ($n = \frac{4}{3}$) จงหาค่า $\sin\theta_c$ และหากแสงตกกระทบทำมุม 60° จากแก้วไปอากาศ ($n = 1$) จะเกิดอะไรขึ้น?

1) แก้วสู่น้ำ: $\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{4/3}{1.5} = \frac{4}{4.5} = \frac{8}{9} \approx \mathbf{0.89}$

2) แก้วสู่อากาศ: $\sin\theta_c = \frac{1.0}{1.5} = 0.67$ ($\theta_c \approx 41.8^\circ$)

เนื่องจากมุมตกกระทบ $60^\circ > 41.8^\circ$ แสงจึงเกิด **การสะท้อนกลับหมด 100%**

เลนส์บาง: เลนส์นูน (Convex Lens) และเลนส์เว้า (Concave Lens)

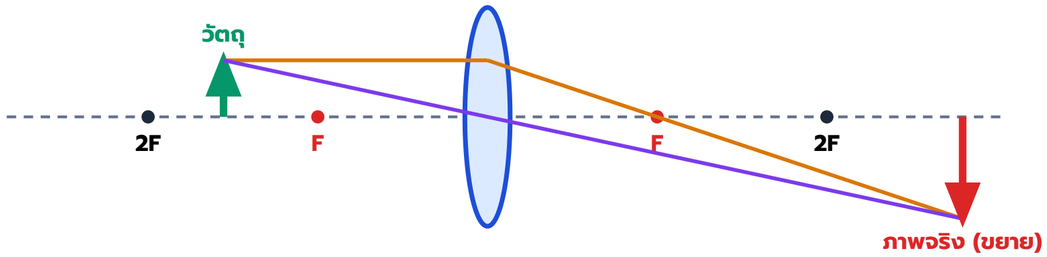
ลักษณะการหักเหและภาพจากเลนส์บาง

- **เลนส์นูน ($f > 0$, รวมแสง):** ตรงกลางหนากว่าขอบ ให้ภาพทั้งจริงและเสมือนขึ้นกับระยะวัตถุ
- **เลนส์เว้า ($f < 0$, กระจายแสง):** ตรงกลางบางกว่าขอบ ให้**ภาพเสมือน หัวตั้ง ขนาดย่อ** อยู่หน้าเลนส์เสมอ

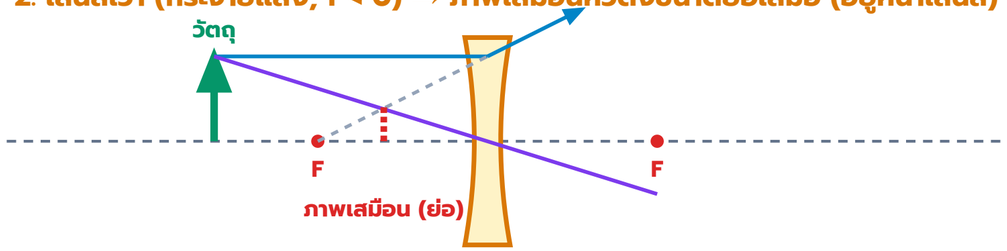
สรุปภาพจากเลนส์นูนตามระยะวัตถุ (s)

ระยะวัตถุ (s)	ชนิดและลักษณะภาพ	ตัวอย่างใช้งาน
$s > 2f$	ภาพจริง หัวกลับ **ขนาดย่อ**	กล้องถ่ายรูป, ดวงตา
$s = 2f$	ภาพจริง หัวกลับ **ขนาดเท่าวัตถุ**	เครื่องถ่ายเอกสาร 1:1
$f < s < 2f$	ภาพจริง หัวกลับ **ขนาดขยาย**	เครื่องฉายโปรเจกเตอร์
$s < f$	ภาพเสมือน หัวตั้ง **ขนาดขยาย**	แว่นขยาย

1. เลนส์นูน (รวมแสง, f > 0) เมื่อวัตถุอยู่ระหว่าง F กับ 2F → ภาพจริงหัวกลับขนาดขยาย



2. เลนส์เว้า (กระจายแสง, f < 0) → ภาพเสมือนหัวตั้งขนาดย่อเสมอ (อยู่หน้าเลนส์)



สมการกระจกโค้งและเลนส์บาง พร้อมหลักกำหนดเครื่องหมาย (+/−)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \qquad M = \frac{I}{O} = \frac{s'}{s} = \frac{f}{s-f} = \frac{s'-f}{f} \qquad P = \frac{1}{f\ (\text{m})}\ (\text{Diopter})$$

ตัวแปร	เครื่องหมายบวก (+)	เครื่องหมายลบ (−)
ความยาวโฟกัส (f)	**อุปกรณ์รวมแสง:** กระจกเว้า, เลนส์นูน	**อุปกรณ์กระจายแสง:** กระจกนูน, เลนส์เว้า
ระยะวัตถุ (s)	วัตถุจริง (วางหน้ากระจก/เลนส์ — ปกติ)	วัตถุเสมือน (ใช้กับระบบเลนส์/กระจกซ้อน)
ระยะภาพ (s')	**ภาพจริง** (หน้ากระจก หรือ หลังเลนส์)	**ภาพเสมือน** (หลังกระจก หรือ หน้าเลนส์)
กำลังขยาย (M)	คำนวณแล้วได้ $s' > 0 \rightarrow$ ภาพจริงหัวกลับ	คำนวณแล้วได้ $s' < 0 \rightarrow$ ภาพเสมือนหัวตั้ง

เคล็ดลับระบบเลนส์ 2 ชิ้น: ภาพจากชิ้นที่ 1 ทำหน้าที่เป็นวัตถุของชิ้นที่ 2 โดย $s_2 = d - s_1'$ (เมื่อ d คือระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ทั้งสอง)

ทัศนอุปกรณ์ การแก้ไขสายตา และความสว่าง (Illuminance)

01 · สายตาและการแก้ไข

สายตาสั้น vs สายตายาว

- **คนสายตาปกติ:** จุดใกล้ $25\ \text{cm}$, จุดไกล ∞
- **สายตาสั้น:** ภาพตกหน้าเรตินา (มองไกลไม่ชัด) $\rightarrow$ แก้ด้วย **เลนส์เว้า** ($s = \infty, s' = -d_{\text{ไกล}}$)
- **สายตายาว:** ภาพตกหลังเรตินา (มองใกล้ไม่ชัด) $\rightarrow$ แก้ด้วย **เลนส์นูน** ($s = 25\ \text{cm}, s' = -d_{\text{ใกล้}}$)

02 · ทัศนอุปกรณ์

กล้องจุลทรรศน์ & โทรทรรศน์

- **แว่นขยาย:** เลนส์นูน 1 อัน ($s < f$) ให้ภาพเสมือนขยาย
- **กล้องจุลทรรศน์:** เลนส์นูน 2 อัน ($f_{\text{วัตถุ}}$ สั้นมาก) ได้ภาพสุดท้ายเสมือนหัวกลับขยาย
- **กล้องโทรทรรศน์:** $f_{\text{วัตถุ}}$ ยาวมาก, กำลังขยาย $M = \frac{f_o}{f_e}$

03 · การส่องสว่าง

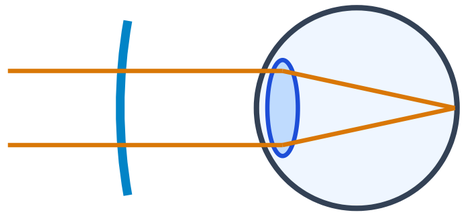
ฟลักซ์ส่องสว่างและความสว่าง

- **ความสว่าง (E, หน่วย lux):**

$$E = \frac{F}{A} = \frac{I \cos\theta}{R^2}$$

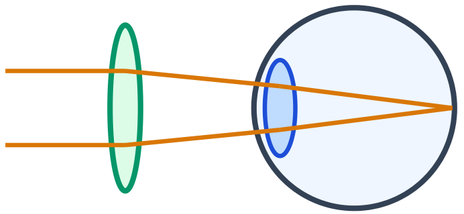
F = ฟลักซ์ส่องสว่าง (lm), I = ความเข้มส่องสว่าง (cd), R = ระยะจากหลอดไฟ

สายตาสั้น (ภาพตกหน้าจอตา)



แก้ด้วย "เลนส์เว้า" ช่วยกระจายแสง

สายตายาว (ภาพตกหลังจอตา)



แก้ด้วย "เลนส์นูน" ช่วยรวมแสง

โจทย์ฝึกทำท้ายบทที่ 4: เลนส์บาง การแก้ไขสายตา และความสว่าง

ข้อที่ 4.5: เลนส์นูนและการแก้ไขสายตาสั้น

ก) วางวัตถุหน้าเลนส์นูน ($f = 15$ cm) เป็นระยะ 10 cm จงหาตำแหน่งและชนิดภาพ
ข) คนสายตาสั้นมองเห็นชัดไกลสุด 50 cm ต้องสวมแว่นสายตาชนิดใด ความยาวโฟกัสเท่าใด?

ก) $\frac{1}{15} = \frac{1}{10} + \frac{1}{s'} \Rightarrow \frac{1}{s'} = -\frac{1}{30} \Rightarrow s' = -\mathbf{30}$ cm (**ภาพเสมือน** ขยาย 3 เท่า)

ข) คนสายตาสั้นใช้**เลนส์เว้า** มองวัตถุไกล ($s = \infty$) ให้ภาพเสมือนอยู่ที่ $s' = -50$ cm:

$\frac{1}{f} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{-50} \Rightarrow f = -\mathbf{50}$ cm (กำลังเลนส์ $P = -2$ D)

ข้อที่ 4.6: ความสว่างบนโต๊ะทำงาน

หลอดไฟจุดเล็กๆ มีความเข้มส่องสว่าง 100 cd แขวนอยู่สูงเหนือโต๊ะในแนวดิ่ง 2 m จงหาความสว่างบนโต๊ะตรงใต้หลอดไฟ และหากเลื่อนหลอดขึ้นสูงเป็น 4 m ความสว่างจะเหลือกี่ลักซ์?

1) แสงตกตั้งฉาก ($\theta = 0^\circ, \cos 0^\circ = 1$): $E_1 = \frac{I}{R^2} = \frac{100}{2^2} = \mathbf{25}$ lux

2) เมื่อระยะห่างเพิ่มเป็น 2 เท่า ($R_2 = 4$ m): $E_2 = \frac{100}{4^2} = \mathbf{6.25}$ lux (ลดลงเหลือ $\frac{1}{4}$ เท่า)

สรุปสูตรสำคัญฟิสิกส์ 3 (ว32203)

บทที่ 1 · SHM

การเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกอย่างง่าย

- $x = A\sin(\omega t + \phi_0),\ v = \pm\omega\sqrt{A^2 - x^2},\ a = -\omega^2 x$
- $v_{\max} = \omega A, \quad a_{\max} = \omega^2 A, \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
- สปริง: $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ | ลูกตุ้ม: $T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$
- พลังงาน: $E = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2$

บทที่ 2 · คลื่นกล

คลื่นและสมบัติของคลื่น

- อัตราเร็ว: $v = f\lambda = \frac{\lambda}{T}$ | ในเชือก: $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$
- ความต่างเฟส: $\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta x = \frac{2\pi}{T}\Delta t$
- หักเห (สเนลล์): $\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ (f คงตัว)
- แทรกสอด: $A_n : d\sin\theta = n\lambda,\ N_n : d\sin\theta = (n - \frac{1}{2})\lambda$
- คลื่นนิ่งในเชือก: $f_n = \frac{nv}{2L} = nf_1$

บทที่ 3 · แสงเชิงคลื่น

สลิตคู่ สลิตเดี่ยว เกรตติง

- สลิตคู่: สว่าง $d\sin\theta = d\frac{x}{L} = n\lambda$, มืด $(n - \frac{1}{2})\lambda$
- ระยะแถบสว่างติดกัน (สลิตคู่): $\Delta x = \frac{\lambda L}{d}$
- สลิตเดี่ยว: มืด $a\sin\theta = a\frac{x}{L} = n\lambda$, กว้างกลาง $w_0 = \frac{2\lambda L}{a}$
- เกรตติง: $d = \frac{1}{N}$, สว่าง $d\sin\theta = n\lambda,\ \sin\theta \le 1$
- การกระเจิงแบบเรย์ลี: $I \propto \frac{1}{\lambda^4}$

บทที่ 4 · แสงเชิงรังสี

กระจก เลนส์ ความลึกปรากฏ

- หักเห: $n = \frac{c}{v},\ n_1\sin\theta_1 = n_2\sin\theta_2,\ \sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$
- ความลึกปรากฏ: $\frac{s'}{s} = \frac{n_{ตา}}{n_{วัตถุ}}$
- กระจก/เลนส์: $\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'},\ M = \frac{I}{O} = \frac{s'}{s} = \frac{f}{s-f}$
- เครื่องหมาย: รวมแสง $f > 0$, กระจายแสง $f < 0$, ภาพเสมือน $s' < 0$
- ความสว่าง: $E = \frac{F}{A} = \frac{I\cos\theta}{R^2}$ (lux)