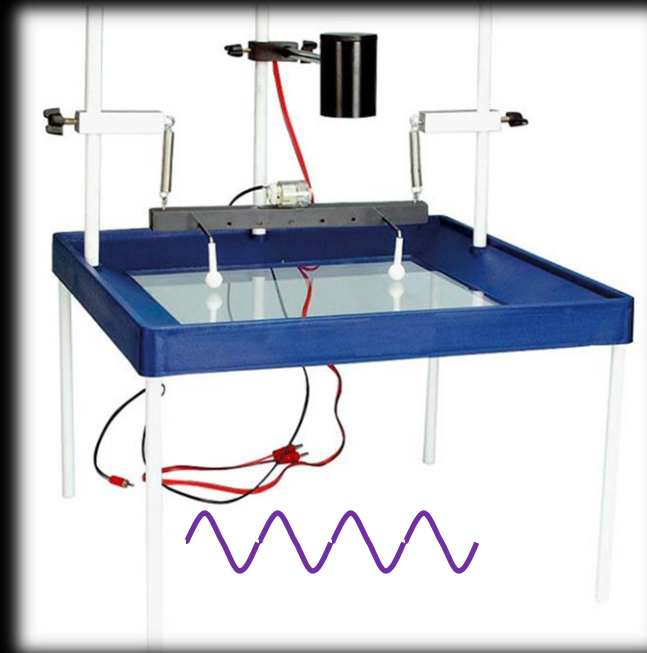




Mechanical waves

- การถ่ายโอนพลังงานของคลื่น
 - การแบ่งชนิดของคลื่น
- คลื่นผิวหน้า
 - องค์ประกอบของคลื่น
- การซ้อนทับกันของคลื่น
- สมบัติของคลื่น
 - การสะท้อน (Reflection)
 - การหักเห (Refraction)
 - การแทรกสอด (Interference)
 - การเลี้ยวเบน (Diffraction)
- คลื่นนิ่ง



การถ่ายโอนพลังงานของคลื่น



อ้าว! เกิดอะไรขึ้น
ทำไมแผ่กระจายเป็น
วงกลม

คลื่นคืออะไร ?

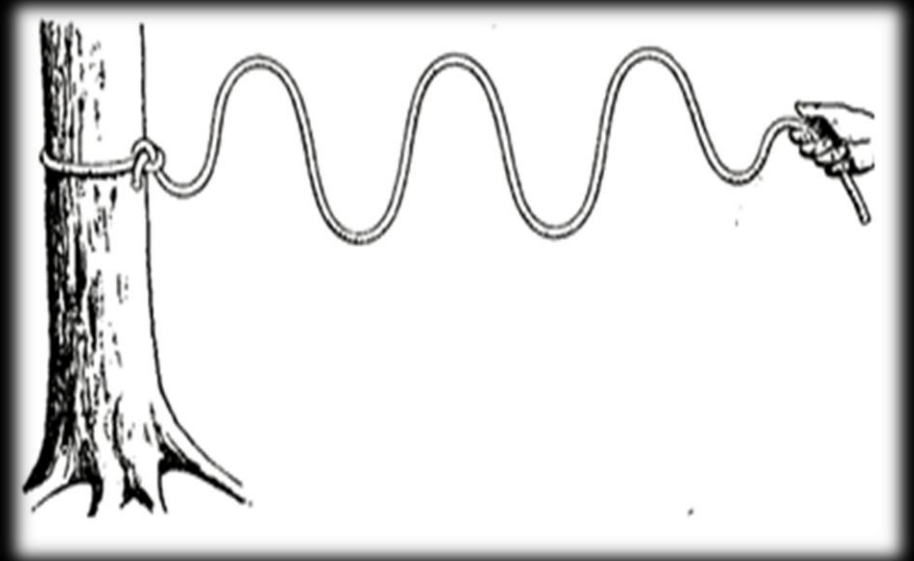
คลื่นเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ การเคลื่อนที่นี้จะแผ่กระจายจากบริเวณที่ถูกรบกวนไปยังอีกบริเวณหนึ่ง เช่น การเกิดคลื่นบนผิวน้ำ

การโยนก้อนหินลงน้ำ เป็นการถ่ายโอนพลังงานจากหินสู่ น้ำ โดยส่งผ่านอนุภาคของน้ำอย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดคลื่นที่ผิวน้ำเคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด เราเรียกคลื่นที่อาศัยตัวกลาง (น้ำ) ในการเคลื่อนที่นี้ว่า “คลื่นกล”

“คลื่นกล”

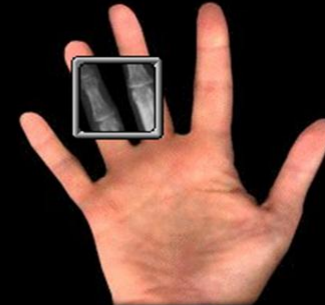


คลื่นผิวหน้า



คลื่นในเส้นเชือก

นักเรียนคิดว่า ถ้าไม่มีตัวกลางคลื่นสามารถแผ่ไปได้หรือไม่ ?

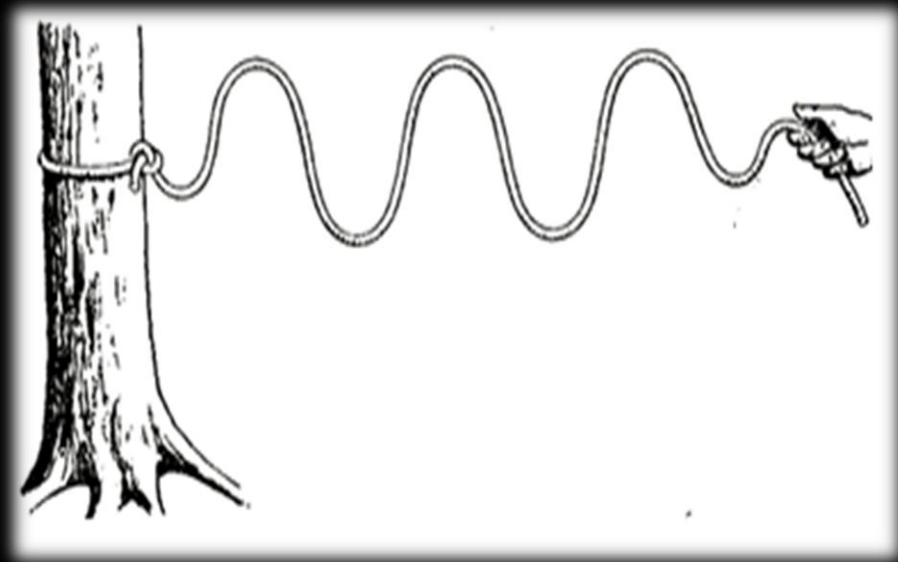


“คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า”สามารถแผ่ไปได้ในบริเวณสุญญากาศหรือไม่มีตัวกลางใดๆ ก็ได้ จัดเป็นคลื่นที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นแสง

การแบ่งชนิดของคลื่น

1. พิจารณาการอาศัยตัวกลาง

- คลื่นกล : อาศัยอนุภาคตัวกลางในการถ่ายถอดพลังงานได้
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า : ไม่ต้องอาศัยอนุภาคตัวกลางก็ถ่ายถอดพลังงานได้



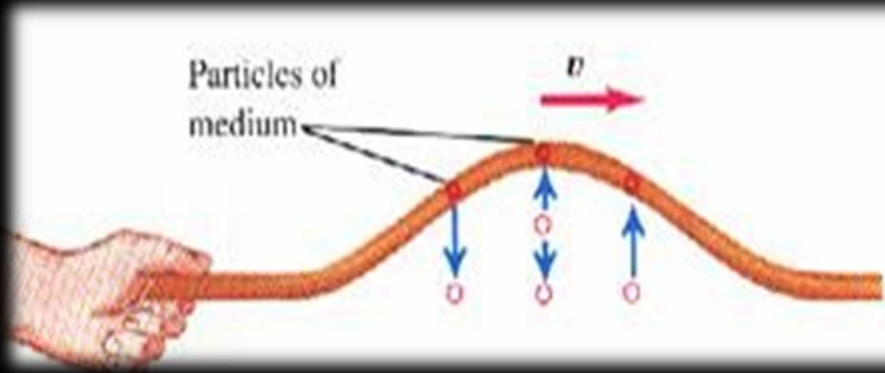
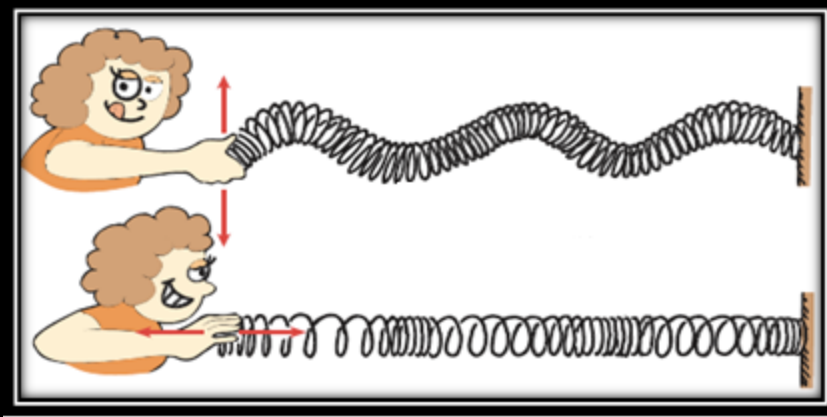
คลื่นในเส้นเชือก
Mechanical waves



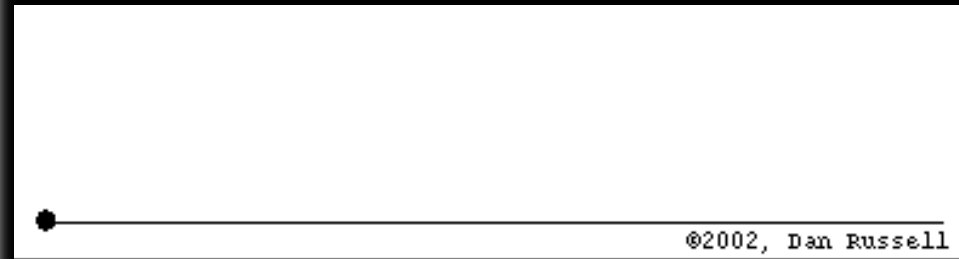
คลื่นแสง
Electromagnetic waves

2. พิจารณาการสั่นของอนุภาคในตัวกลาง

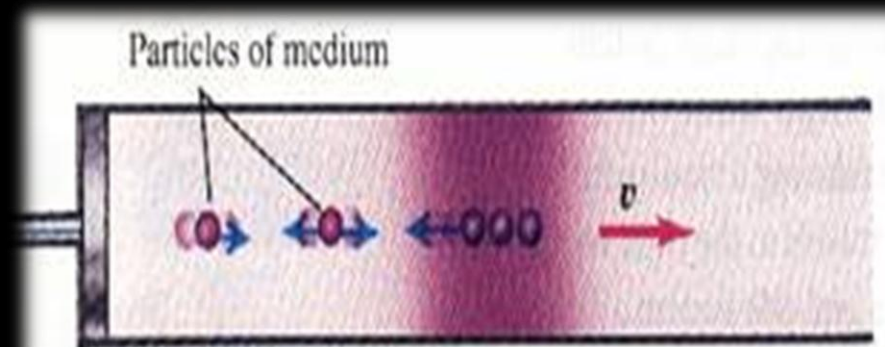
- คลื่นตามขวาง : อนุภาคของตัวกลางสั่นตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น
- คลื่นตามยาว : อนุภาคของตัวกลางสั่นตามแนวทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น



Transvers waves



©2002, Dan Russell



longitudinal waves



©2002, Dan Russell

3. พิจารณาการรบกวนตัวกลาง

- คลื่นคด : เกิดจากแหล่งกำเนิดสั้นหรือการรบกวนตัวกลางเป็นช่วงเวลาสั้น ๆ
- คลื่นต่อเนื่อง : เกิดจากแหล่งกำเนิดสั้นหรือการรบกวนตัวกลางอย่างต่อเนื่อง

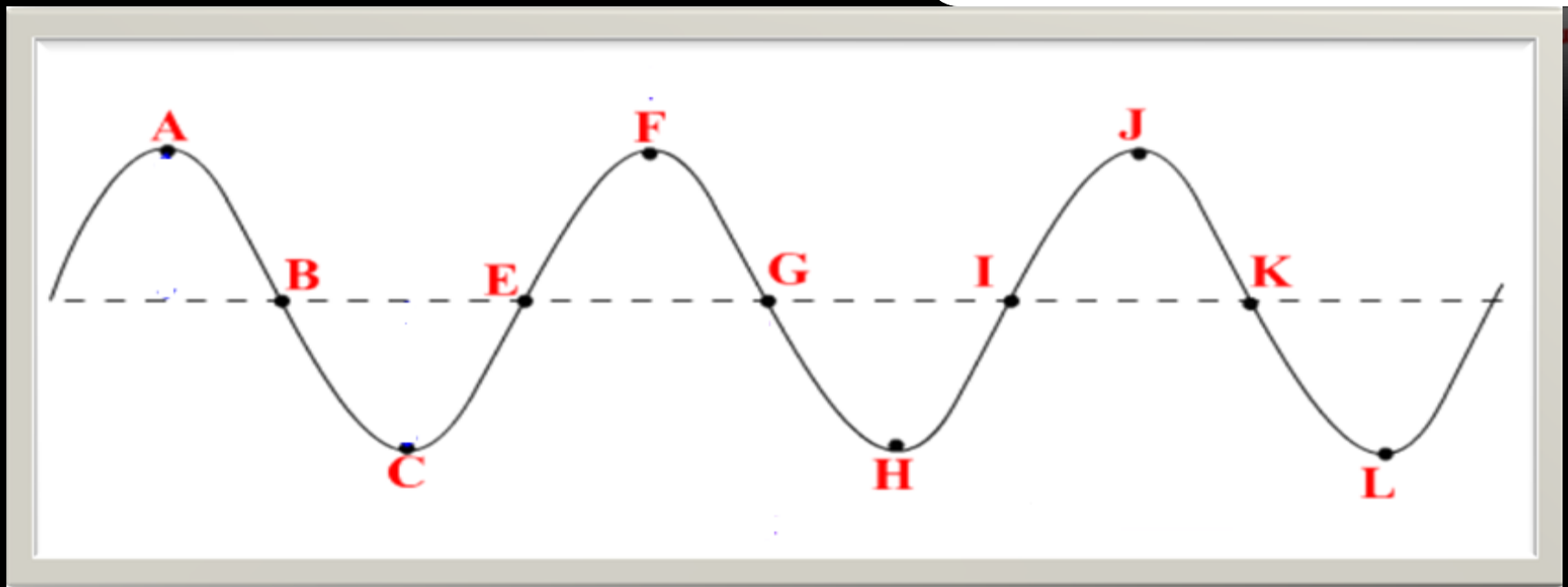
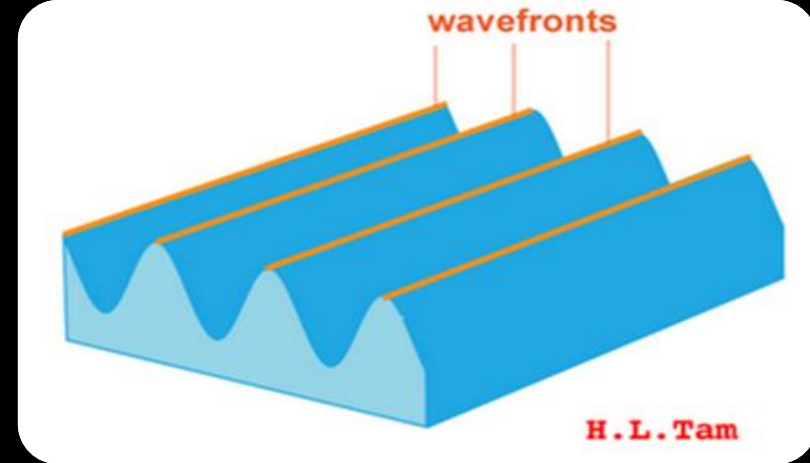


Pulse waves

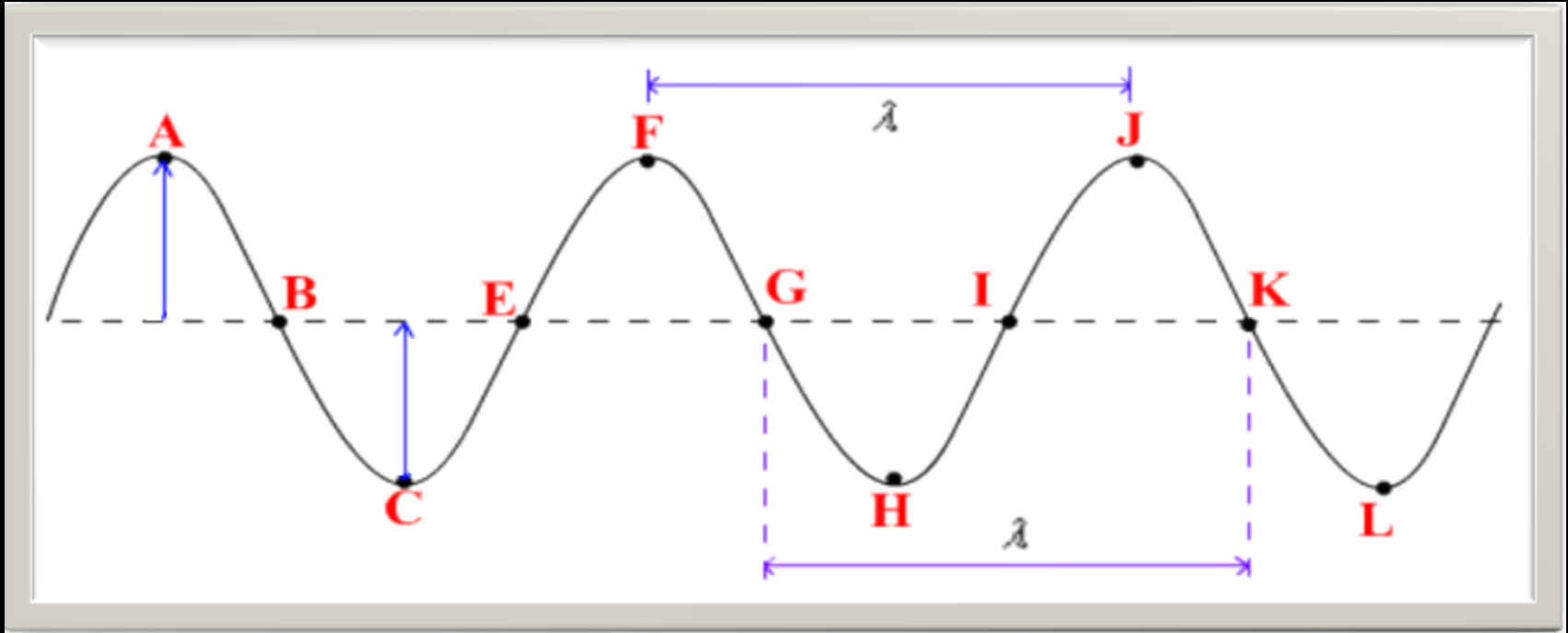


Continuous Waves

คลื่นผิวน้ำ : องค์ประกอบของคลื่น

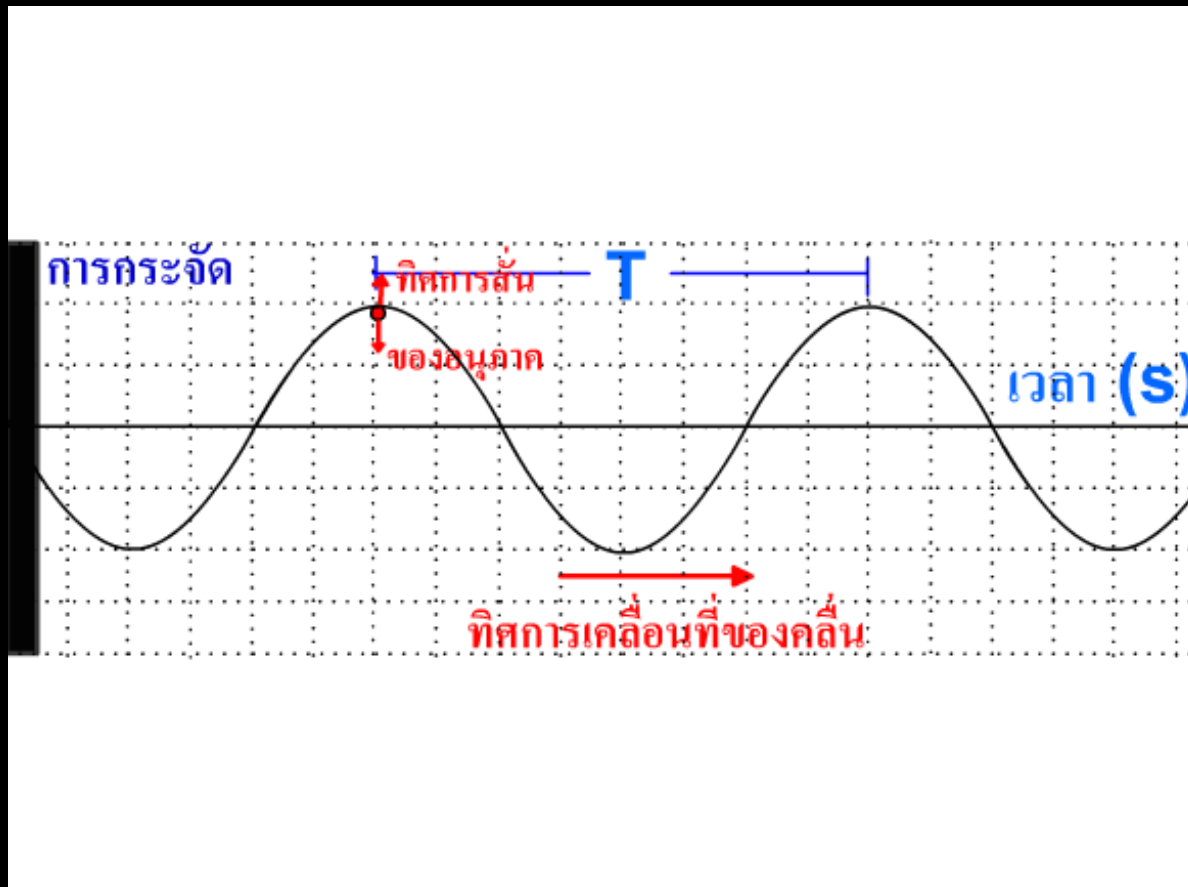


สันคลื่น (Crest) เป็นตำแหน่งสูงสุดของคลื่น เช่น ตำแหน่ง **A, F, J** ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่สูงสุด
ท้องคลื่น (Trough) เป็นตำแหน่งต่ำสุดของคลื่น เช่น ตำแหน่ง **C, H, L**

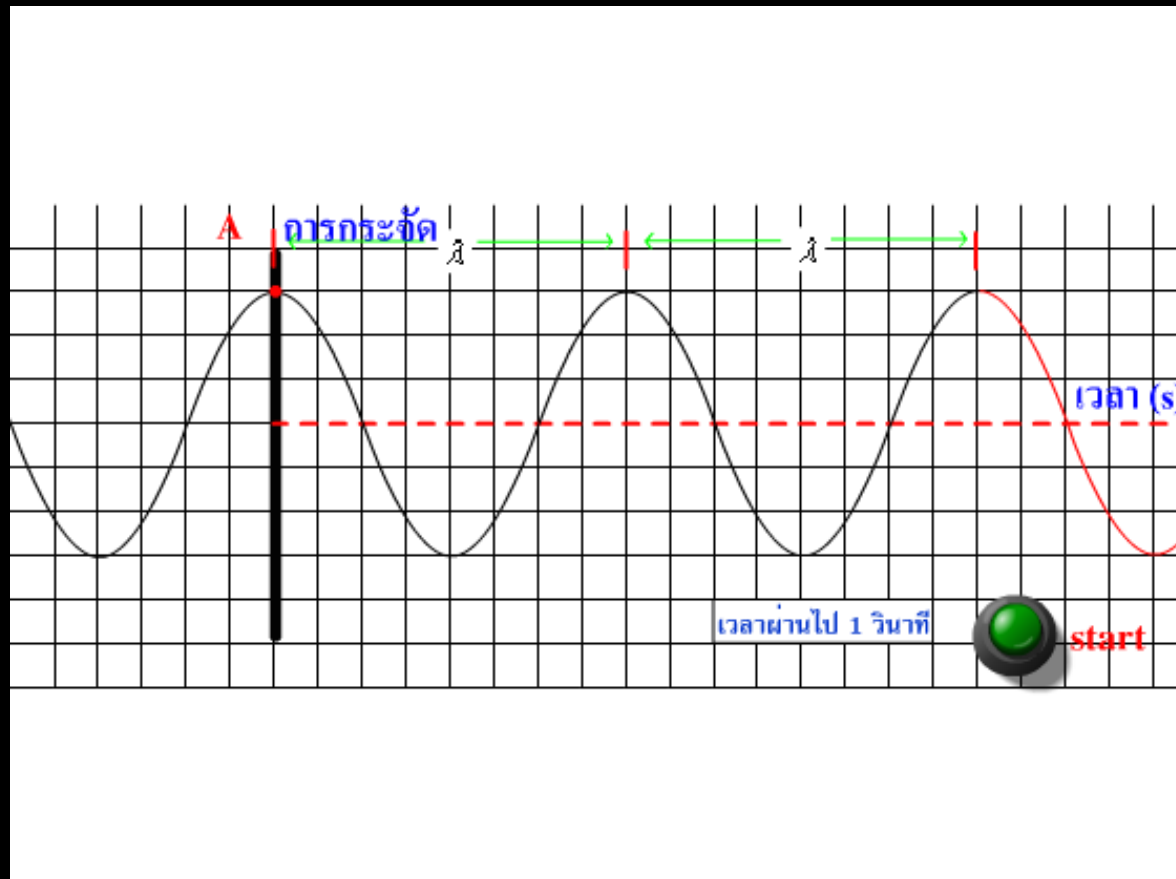


แอมพลิจูด (Amplitude) เป็นระยะความสูงจากตำแหน่งสมดุล(เส้นประ) ถึงสันคลื่น หรือ ระยะจากท้องคลื่นถึงตำแหน่งสมดุล เช่น ระยะจากเส้นปกติถึงตำแหน่ง **A** หรือระยะจากเส้นปกติ ถึงตำแหน่ง **C**

ความยาวคลื่น (Wavelength) เป็นความยาวของหนึ่งลูกคลื่น ซึ่งสามารถวัดได้จาก สัน คลื่นถึงสันคลื่นที่ติดกัน เช่น ระยะจากตำแหน่ง **F** ถึง **J** หรือ ระยะจากตำแหน่ง **G** ถึง **K** นิยมใช้สัญลักษณ์ (lambda) (λ)



คาบ (Period) เป็นระยะเวลาที่ตำแหน่งใด ๆ บนคลื่นเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ คาบมีหน่วยเป็น วินาที เราแทนสัญลักษณ์คาบด้วยตัว **T**



ความถี่ (Frequency) เป็นปริมาณที่แสดงว่า คลื่นเคลื่อนที่ไปได้กี่ลูกในหนึ่งวินาที หน่วยของความถี่คือ รอบต่อวินาที หรือ เฮิรตซ์ (Hz) เราแทนสัญลักษณ์ความถี่ด้วย f

ความสัมพันธ์ระหว่างคาบเวลา (T) และความถี่ของคลื่น (f)

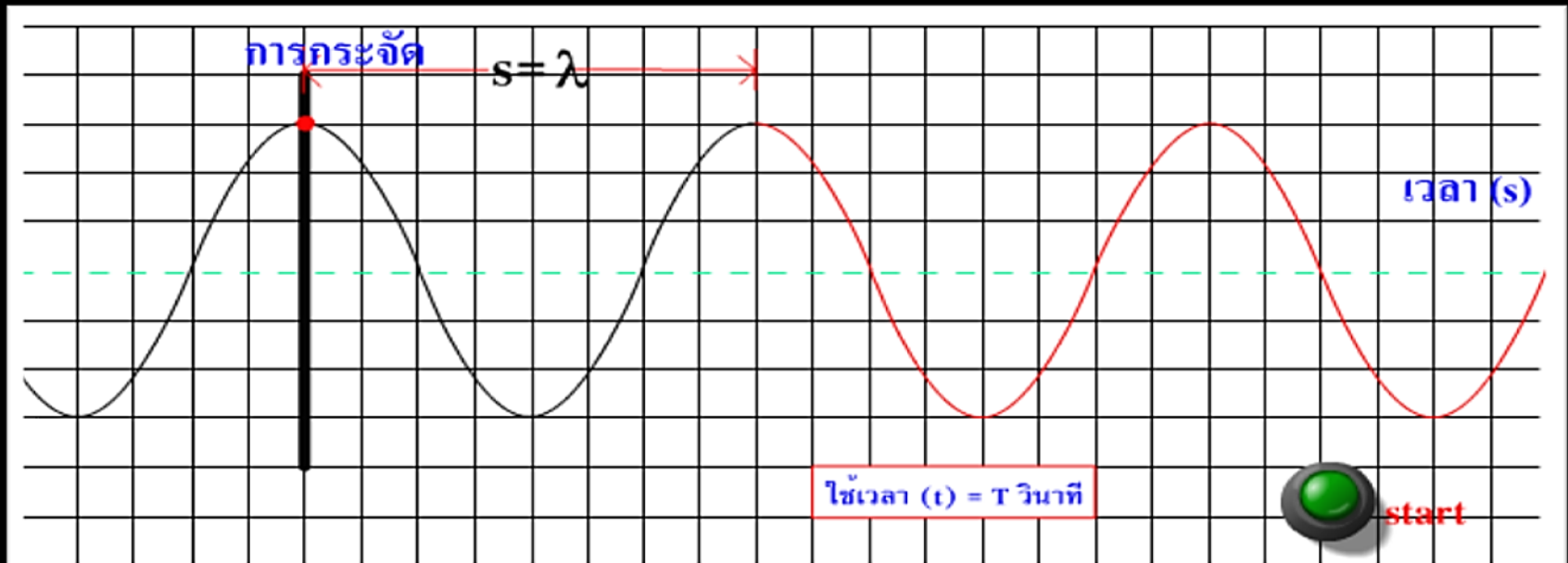
ในเวลา T วินาที คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งได้ 1 ลูกคลื่น

ในเวลา 1 วินาที คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งได้ $\frac{1}{T}$ ลูกคลื่น

เนื่องจาก จำนวนลูกคลื่นที่ผ่านจุดหนึ่งๆ ในเวลา 1 วินาที คือ ความถี่
จะได้ว่า...

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

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

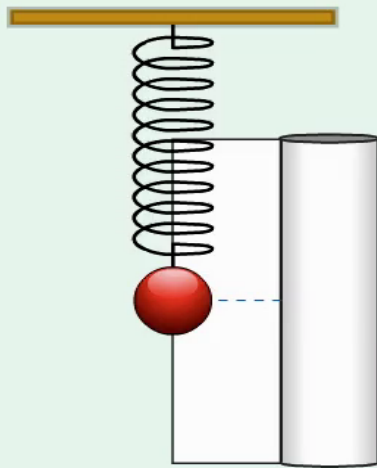


ในเวลา T วินาที คลื่นเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง λ เมตร
 เนื่องจาก ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา คือ อัตราเร็วคลื่น จะได้ว่า

อัตราเร็วคลื่น (wave speed)

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

พิจารณาการเคลื่อนที่แบบมีคาบ



PHYSICS@UNSW

▶ play
◻ stop
▶▶ step

The screenshot shows a simulation interface. On the left, there is a circular path with a purple dot on its horizontal axis. In the center, a vertical grey cylinder is shown with a mass hanging from a spring. On the right, a graph plots displacement y against time t , showing a sinusoidal wave. A purple dot is marked on the graph at the first zero-crossing. The text "from PHYSCLIPS" is visible in the bottom right corner.

from PHYSCLIPS

เฟสของคลื่น (เฟส, ϕ) : เป็นการบอกตำแหน่งบนหน้าคลื่นในรูปของมุมหน่วยของศาหรือเรเดียน

360°

เฟสตรงกัน (Inphase)

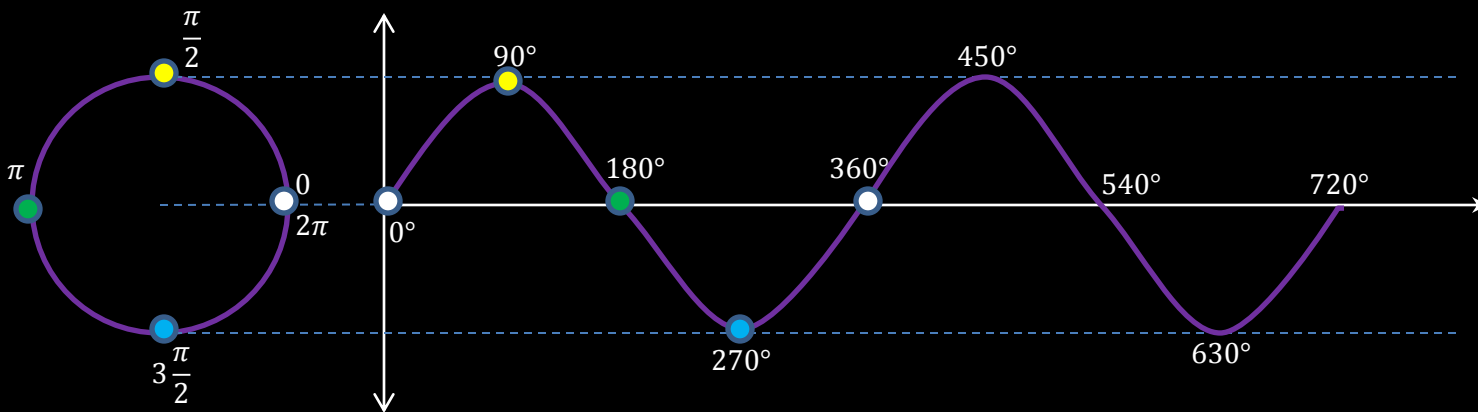
- จุด 2 จุดบนคลื่นมีการกระจัดเท่ากัน
- ลักษณะการสั่นไปทิศทางเดียวกัน เช่น 90°, 450°

ระยะห่าง λ เฟสต่าง 2π เวลาต่าง T

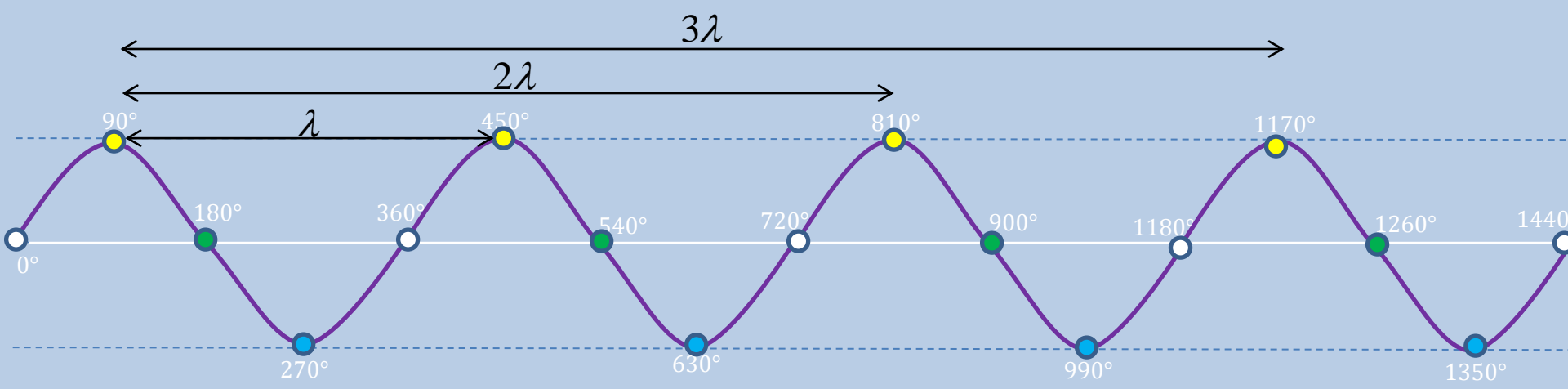
เฟสตรงข้าม (Out of phase)

- จุด 2 จุดบนคลื่นมีการกระจัดเท่ากัน
- ตำแหน่งและทิศทางการสั่นตรงข้ามกัน เช่น 90°, 270°

ระยะห่าง $\lambda/2$ เฟสต่าง π เวลาต่าง $T/2$

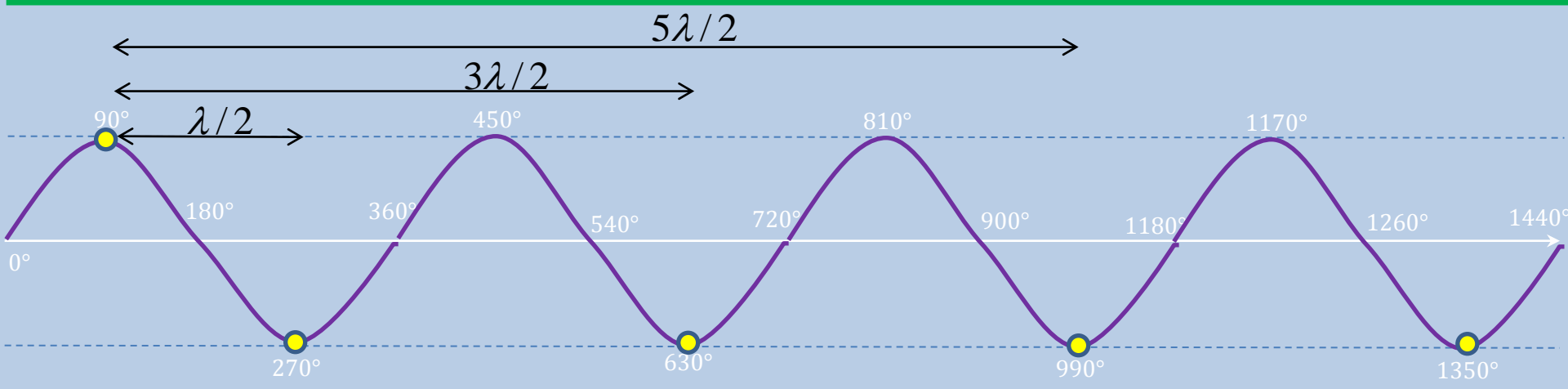


การพิจารณาเฟสของคลื่น



เฟสตรงกัน

- λ → จุดทั้งสองระยะห่างกัน $\lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots, n\lambda$
 - ϕ → จุดทั้งสองเฟสต่างกัน $2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots, 2n\pi$
 - T → จุดทั้งสองเวลาต่างกัน $T, 2T, 3T, \dots, nT$
- } $n = 1, 2, 3, \dots$



เฟสตรงข้าม

- λ → จุดทั้งสองระยะห่างกัน $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots, (n-1/2)\lambda$
 - ϕ → จุดทั้งสองเฟสต่างกัน $\pi, 3\pi, 5\pi, \dots, (2n-1)\pi$
 - T → จุดทั้งสองเวลาต่างกัน $T/2, 3T/2, 5T/2, \dots, (n-1/2)T$
- } $n = 1, 2, 3, \dots$

ความต่างเฟส ($\Delta\phi$) : จุด 2 จุดบนคลื่นขบวนเดียวกันหรือบนคลื่นหลายขบวนที่มีเฟสต่างกัน

พิจารณาระยะห่าง Δx

ถ้าจุด 2 จุดบนคลื่นห่างกัน λ จะมีเฟสต่างกัน 2π เรเดียน

ถ้าจุด 2 จุดบนคลื่นห่างกัน Δx จะมีเฟสต่างกัน $\frac{2\pi\Delta x}{\lambda}$ เรเดียน

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

พิจารณาระยะห่าง Δt

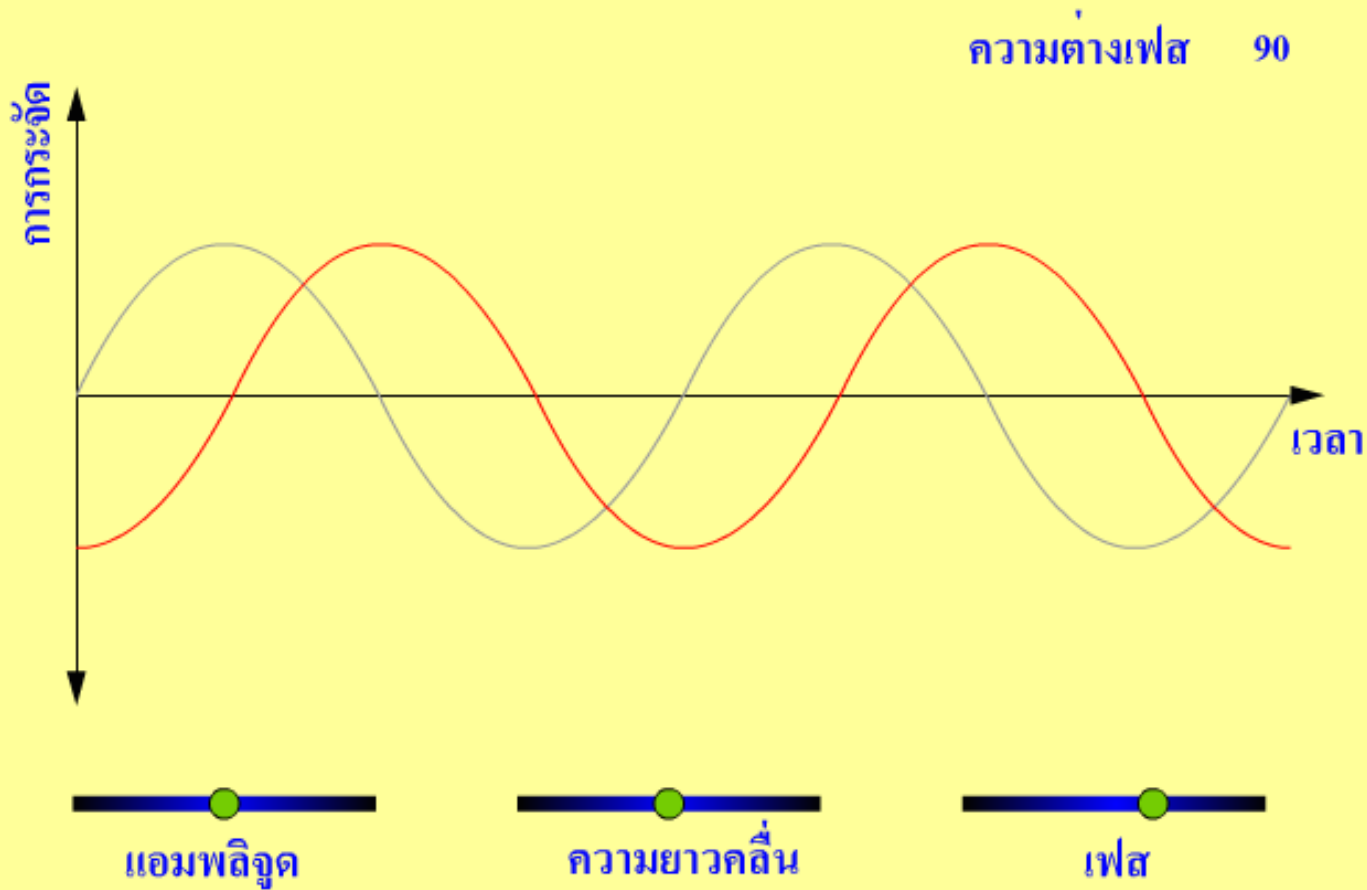
ถ้าจุด 2 จุดบนใช้เวลาต่างกัน T จะมีเฟสต่างกัน 2π เรเดียน

ถ้าจุด 2 จุดบนใช้เวลาต่างกัน Δt จะมีเฟสต่างกัน $\frac{2\pi\Delta t}{T}$ เรเดียน

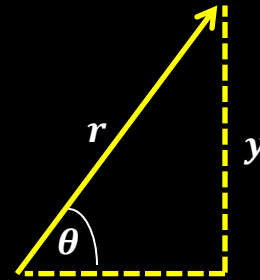
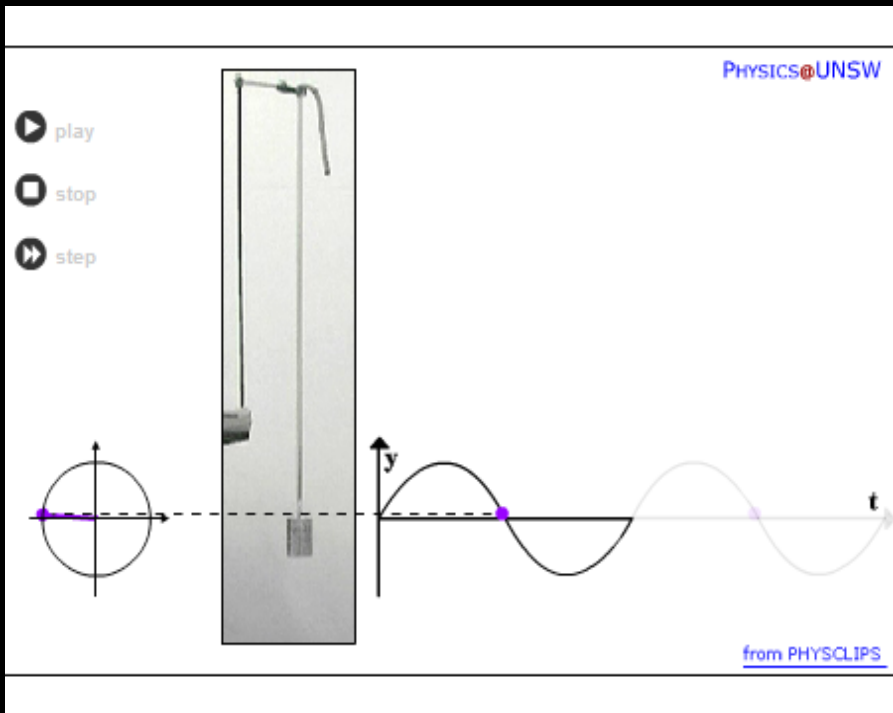
$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta t}{T}$$

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

ความต่างเฟส ($\Delta\phi$) : ตัวอย่างการพิจารณาความต่างเฟสของคลื่น



การเคลื่อนที่ของคลื่นแบบรูปไซน์ (Sinusoidal wave)



$$\sin\theta = \frac{y}{r}$$

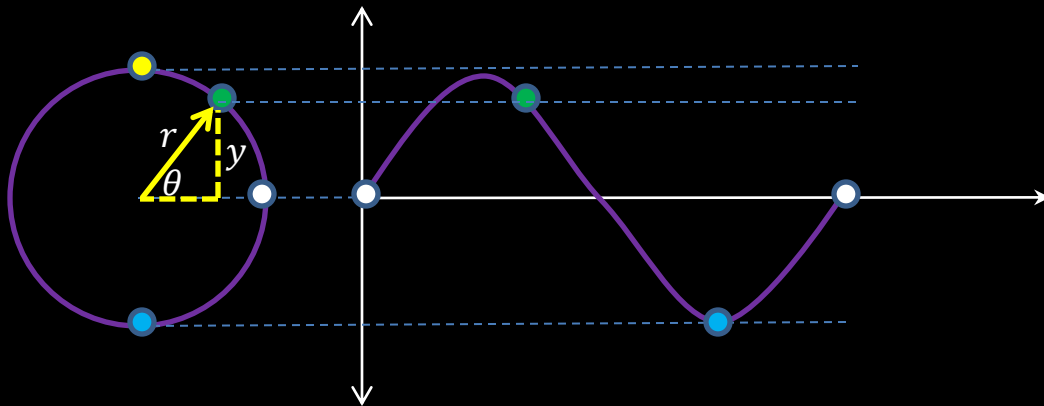
$y = r\sin\theta$; y คือระยะกระจัดของอนุภาคบนแกน y

$y = A\sin\theta$; เมื่อ $r = A$ ระยะกระจัดมากที่สุด

$y = A\sin\theta$; $\omega = \frac{\theta}{t}$; $\theta = \omega t$

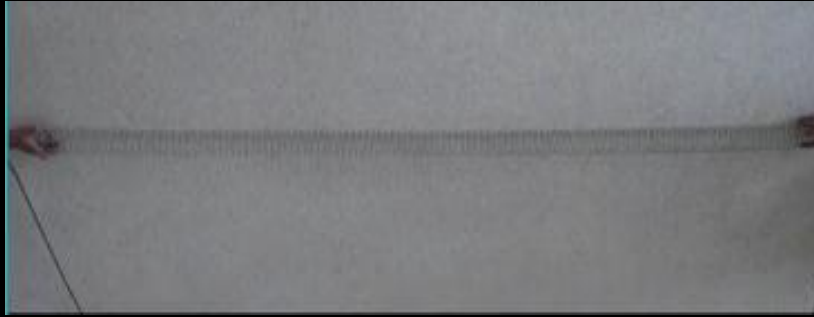
$$y = A\sin\omega t$$

$$y = A\sin(\omega t + \phi) ; \phi \text{ คือ มุมเฟสเริ่มต้น}$$



การซ้อนทับกันของคลื่น (superposition)

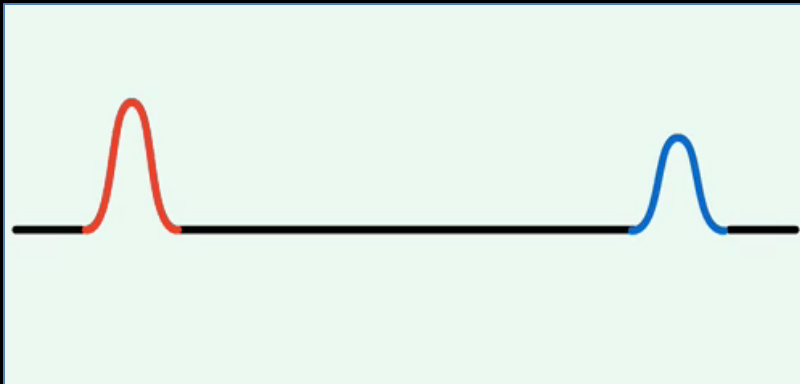
การสับปลายลวดสปริงทั้งสองด้านไปทางเดียวกัน



การสับปลายลวดสปริงทั้งสองด้านทิศทางตรงข้าม



การซ้อนทับกันของคลื่นผลการกระจัดทิศเดียวกัน



การซ้อนทับกันของคลื่นผลการกระจัดตรงข้าม

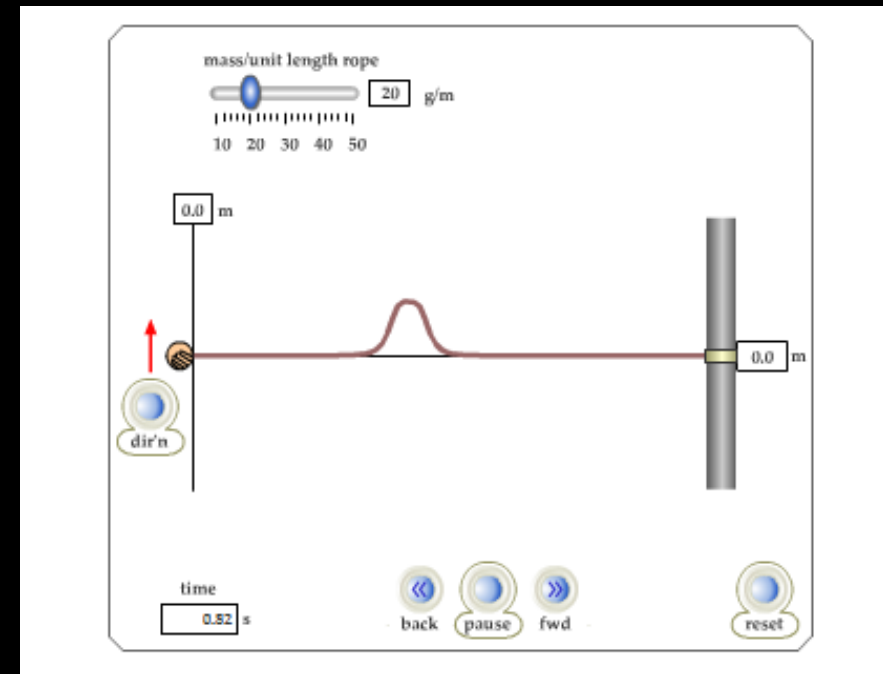
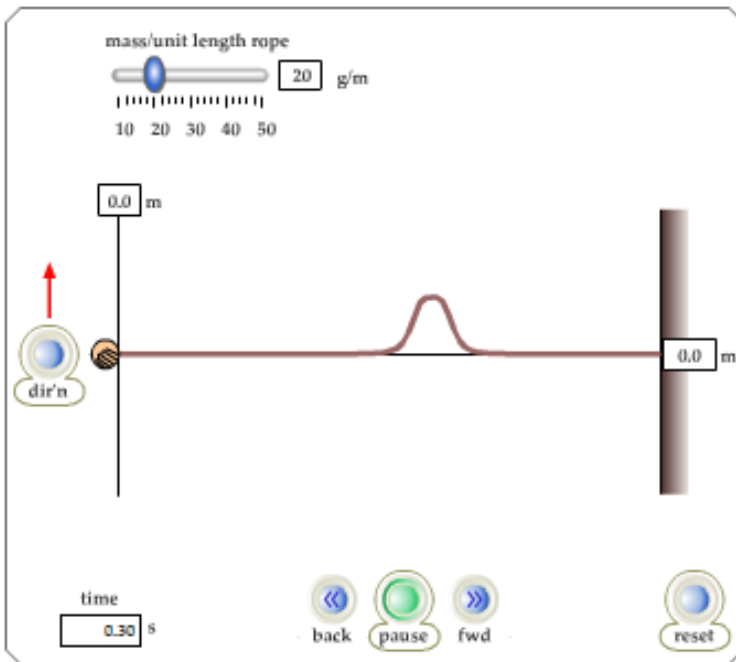


สมบัติของคลื่น

การสะท้อน (Reflection) : “คลื่นเคลื่อนที่กระทบสิ่งกีดขวางแล้วเปลี่ยนทิศทางกลับมาในตัวเองเดิม”

การเกิดคลื่นในเชือกปลายตรึง

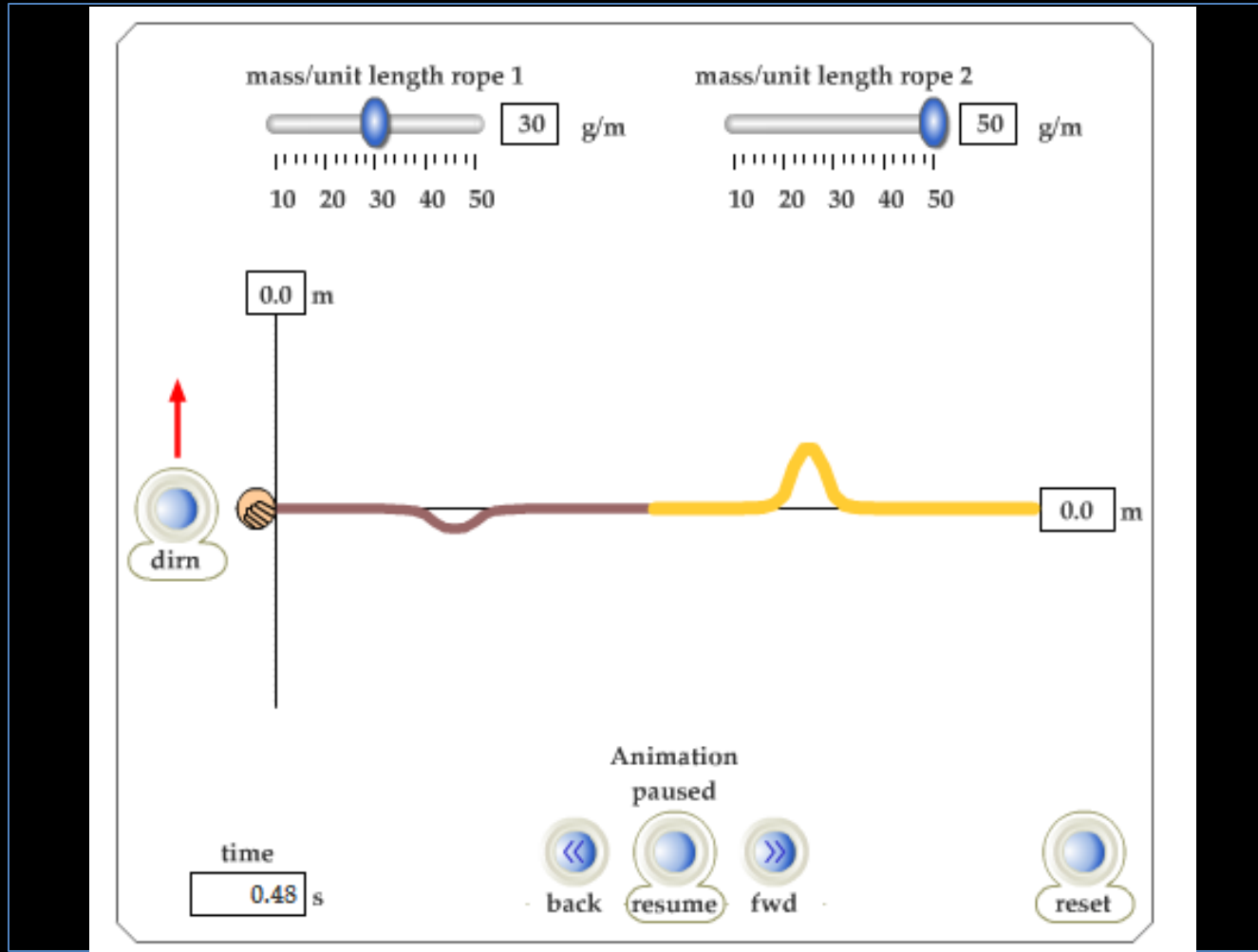
การเกิดคลื่นในเชือกปลายติดห่วงอิสระ



“เฟสเปลี่ยนไป 180 องศาหรือการกระจัดทิศตรงข้าม”

“เฟสคงเดิมหรือการกระจัดทิศเดิม”

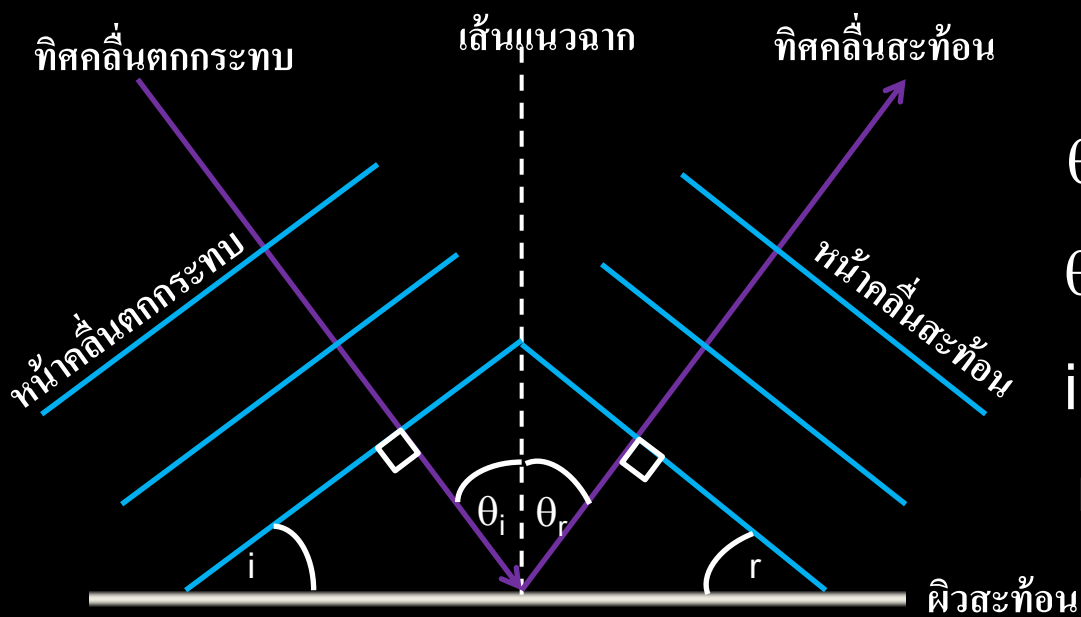
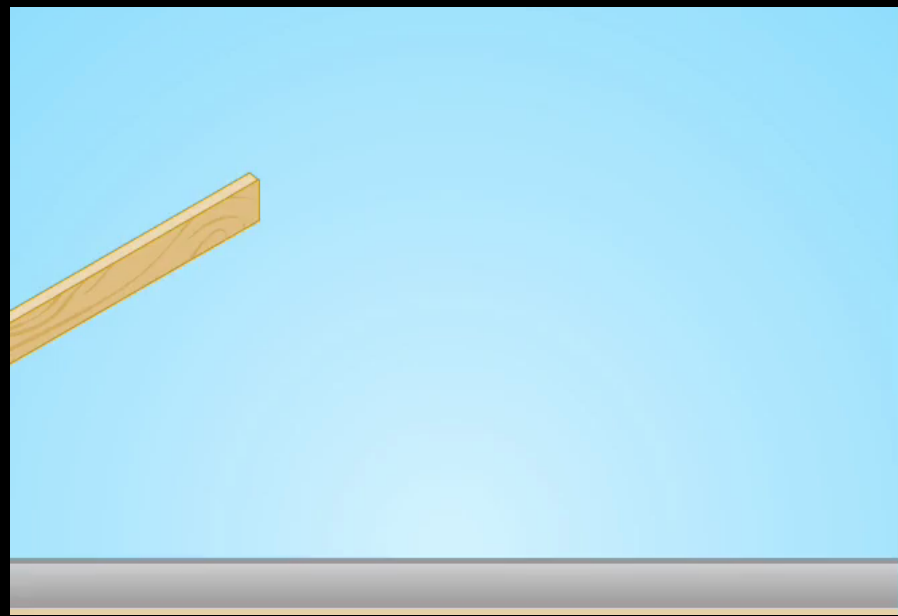
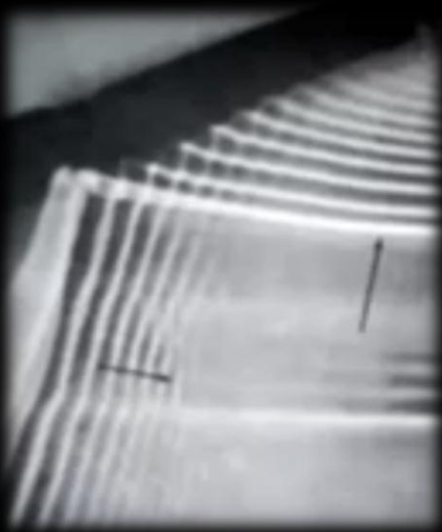
การเปลี่ยนเฟสของคลื่นในเชือกเส้นเล็ก(ความหนาแน่นน้อย) กับเส้นใหญ่ (ความหนาแน่นมาก)



เชือกเส้นเล็ก(ความหนาแน่นน้อย) → เส้นใหญ่ (ความหนาแน่นมาก) : คลื่นสะท้อนเปลี่ยนเฟส 180 องศา

เชือกเส้นใหญ่(ความหนาแน่นมาก) → เส้นเล็ก (ความหนาแน่นน้อย) : คลื่นสะท้อนเฟสคงเดิม

พิจารณาการสะท้อนของคลื่นหน้าตรง

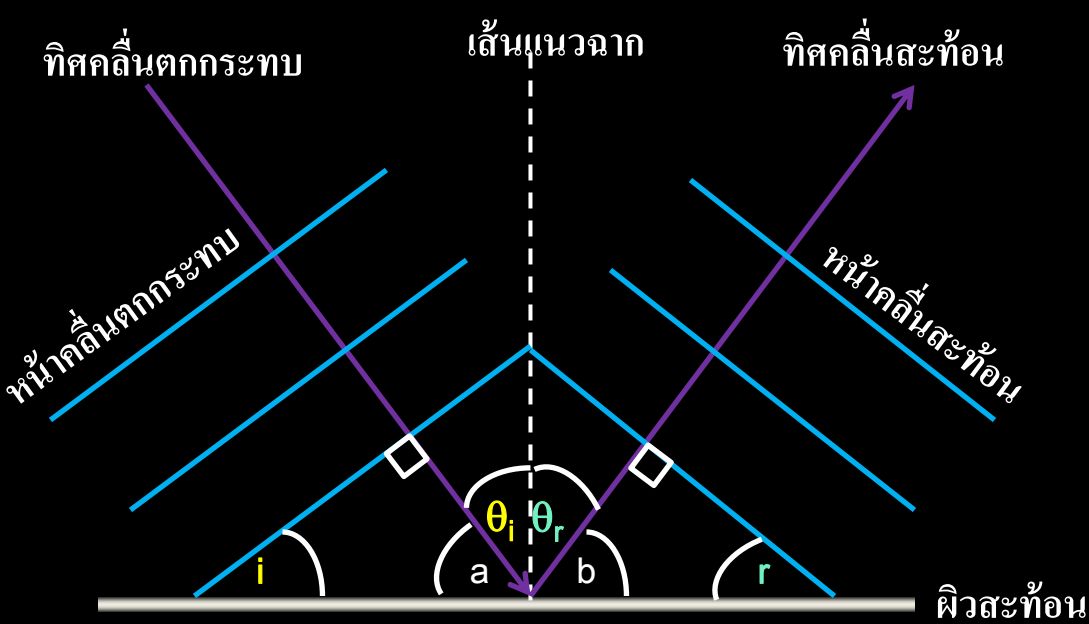


θ_i คือ มุมทิศคลื่นตกกระทบทำกับเส้นแนวฉาก

θ_r คือ มุมทิศคลื่นสะท้อนทำกับเส้นแนวฉาก

i คือ มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับผิวสะท้อน

r คือ มุมที่หน้าคลื่นสะท้อนทำกับผิวสะท้อน



θ_i คือ มุมทิศคดโค้งตกกระทบบทำกับเส้นแนวนอน

θ_r คือ มุมทิศคดโค้งสะท้อนทำกับเส้นแนวนอน

i คือ มุมที่หน้าคดโค้งตกกระทบบทำกับผิวสะท้อน

r คือ มุมที่หน้าคดโค้งสะท้อนทำกับผิวสะท้อน

พิจารณา $i + a = 90^\circ$

$$\theta_i + a = 90^\circ$$

$$\theta_i = i \quad (\text{มุมตกกระทบบ} = \text{มุมที่หน้าคดโค้งตกกระทบบทำกับผิวสะท้อน})$$

พิจารณา $r + b = 90^\circ$

$$\theta_r + b = 90^\circ$$

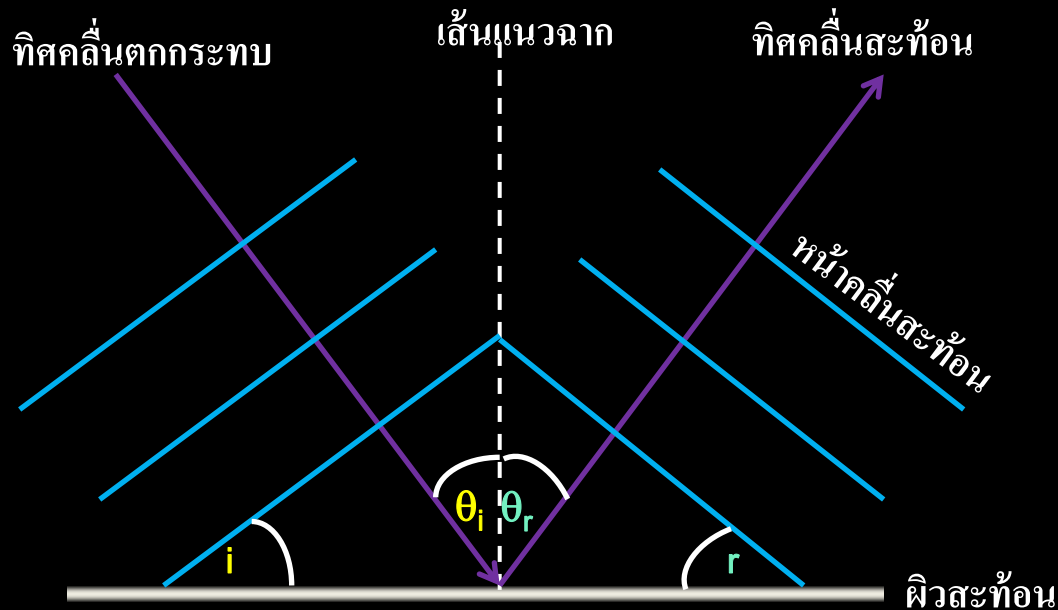
$$\theta_r = r \quad (\text{มุมสะท้อน} = \text{มุมที่หน้าคดโค้งสะท้อนทำกับผิวสะท้อน})$$

สรุปกฎการสะท้อน

1. มุมตกกระทบ = มุมสะท้อน

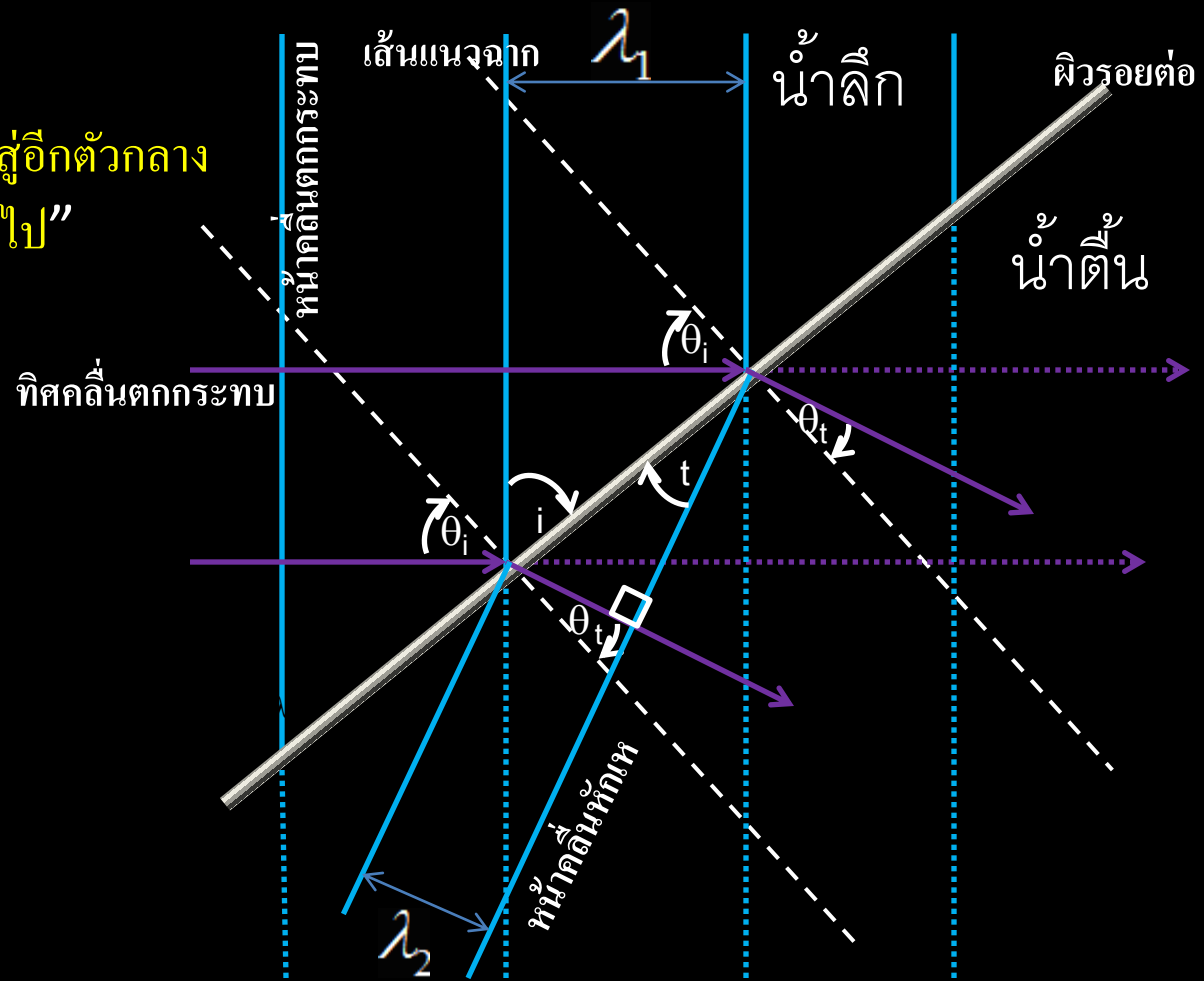
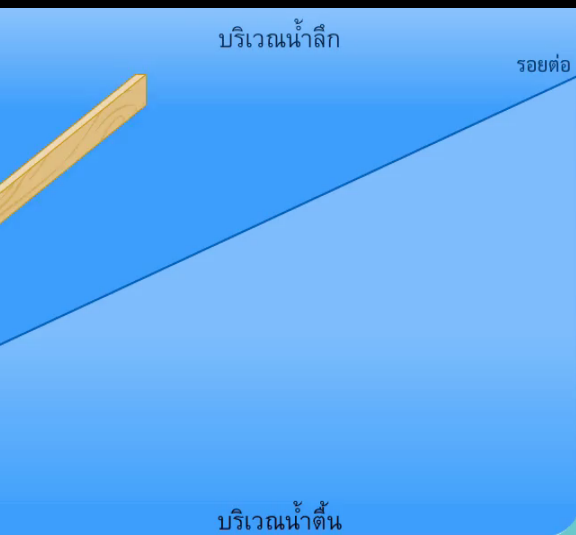
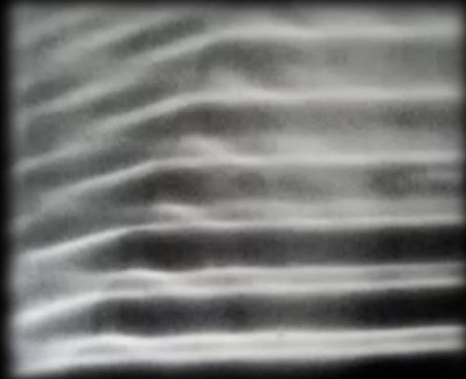
2. มุมที่ทิศคลื่นทำกับเส้นแนวฉาก = มุมที่หน้าคลื่นทำกับผิวสะท้อน

3. ทิศคลื่นตกกระทบ ทิศคลื่นสะท้อน และเส้นแนวฉากอยู่ในระนาบเดียวกัน



การหักเห (Refraction)

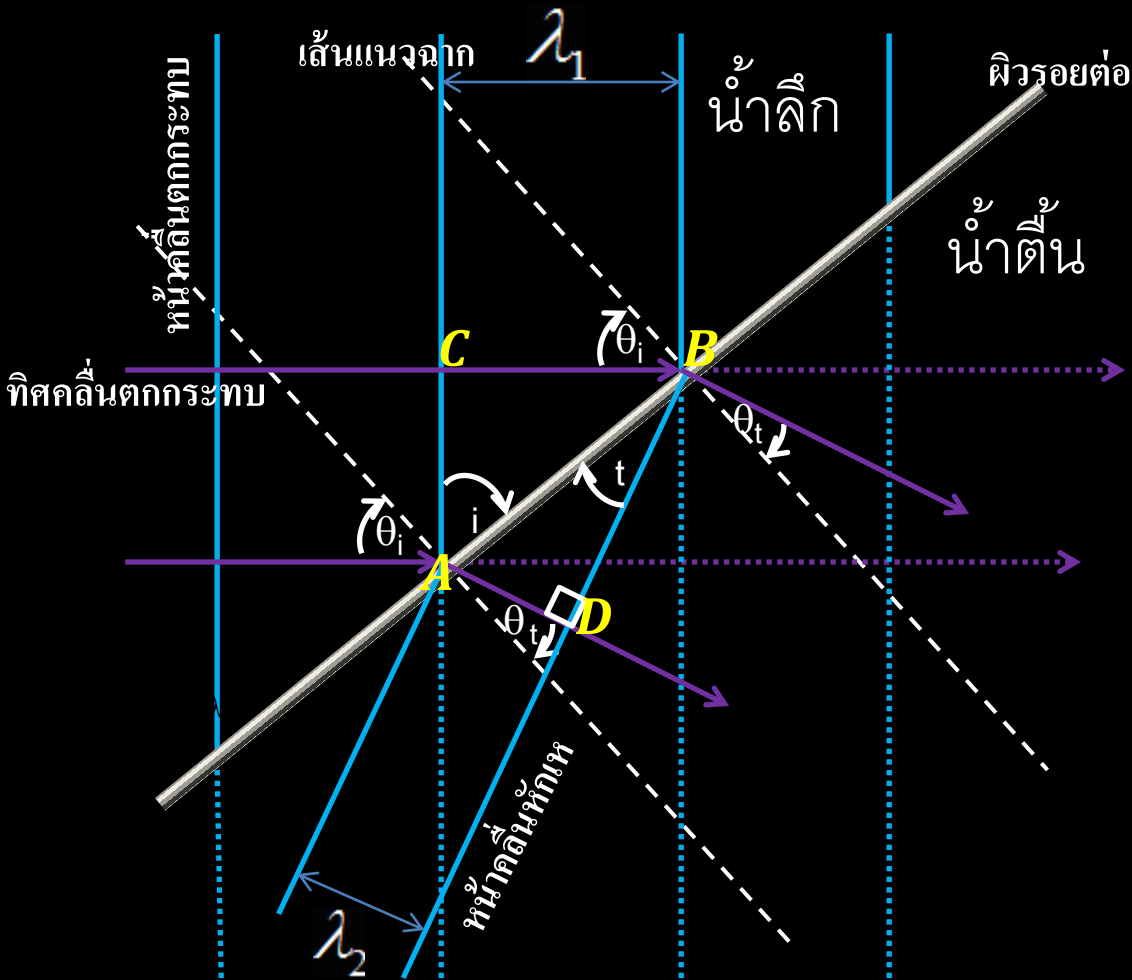
“คลื่นเคลื่อนที่จากตัวกลางหนึ่ง ผ่านไปสู่อีกตัวกลางหนึ่ง แล้วทำให้อัตราเร็วของคลื่นเปลี่ยนไป”



θ_i คือ มุมที่คลื่นตกกระทบทำกับเส้นแนวฉาก i คือ มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับรอยต่อ

θ_t คือ มุมที่คลื่นหักเหทำกับเส้นแนวฉาก t คือ มุมที่หน้าคลื่นหักเหทำกับรอยต่อ

- น้ำลึก \rightarrow น้ำตื้น
- ความยาวคลื่นมาก \rightarrow ความยาวคลื่นน้อย
- อัตราเร็วมาก \rightarrow อัตราเร็วน้อย
- มุมโต \rightarrow มุมเล็ก



θ_i คือ มุมที่ทิศคลื่นตกกระทบทำกับเส้นแนวฉาก

θ_t คือ มุมที่ทิศคลื่นหักเหทำกับเส้นแนวฉาก

i คือ มุมที่หน้าคลื่นตกกระทบทำกับรอยต่อ

t คือ มุมที่หน้าคลื่นหักเหทำกับรอยต่อ

พิจารณา $\sin i = \frac{BC}{AB} = \frac{\lambda_1}{AB}$

$\sin t = \frac{AD}{AB} = \frac{\lambda_2}{AB}$

$$\frac{\sin i}{\sin t} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

พิจารณา ในน้ำลึก $v_1 = f\lambda_1$

ในน้ำตื้น $v_2 = f\lambda_2$

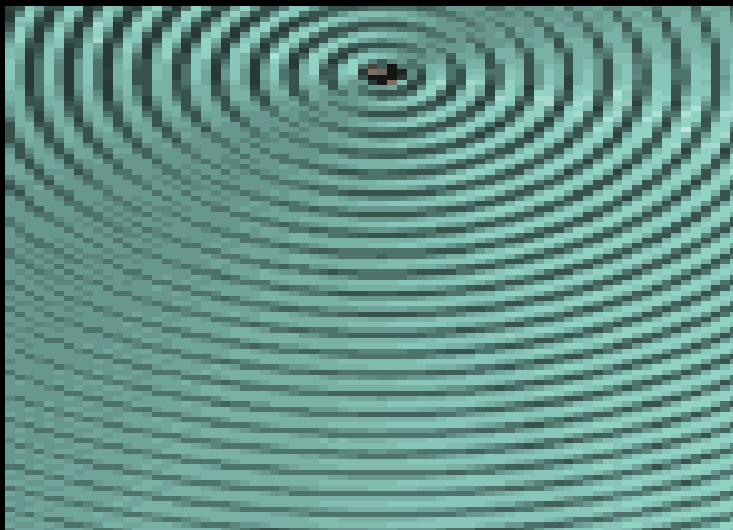
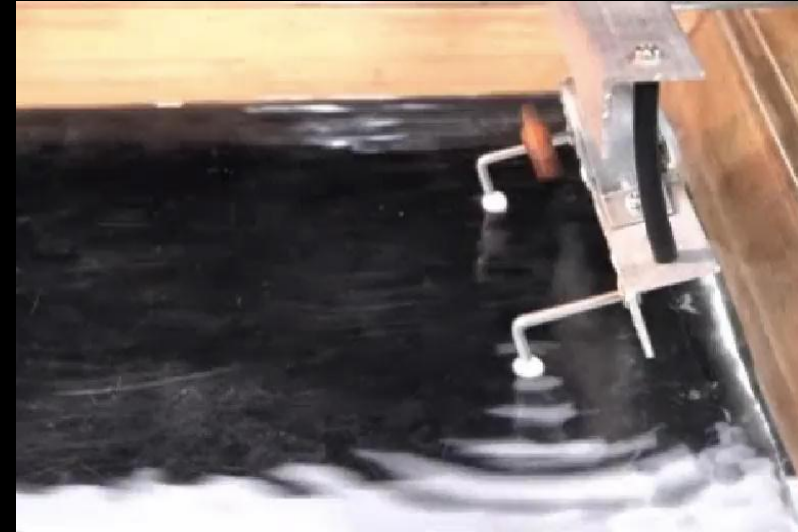
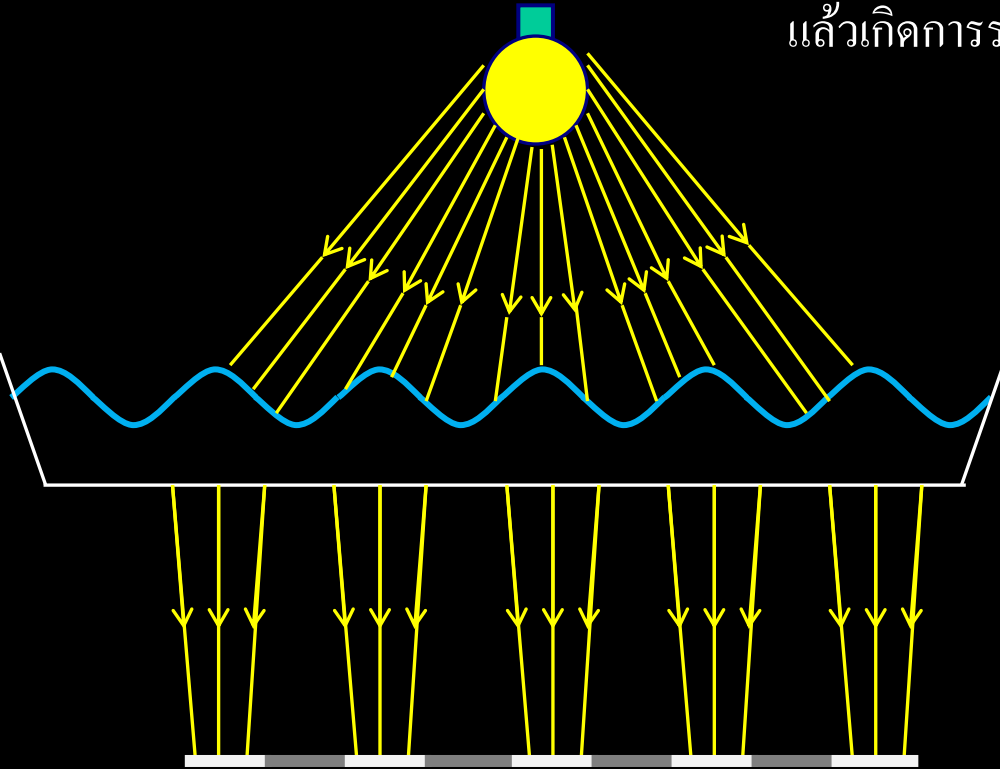
$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{f\lambda_1}{f\lambda_2}$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

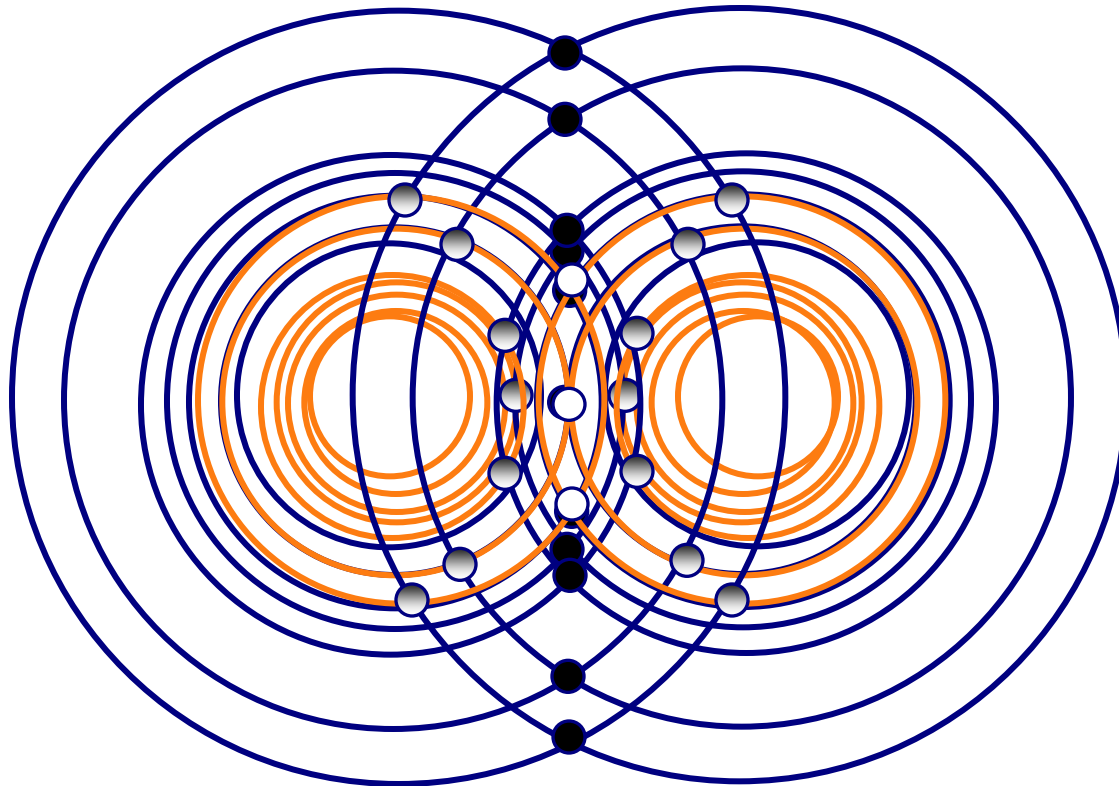
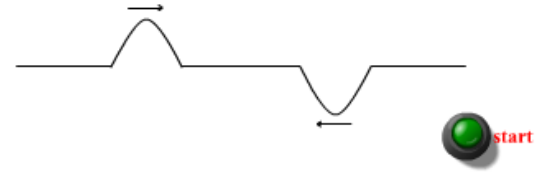
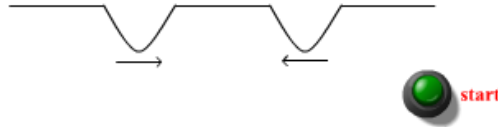
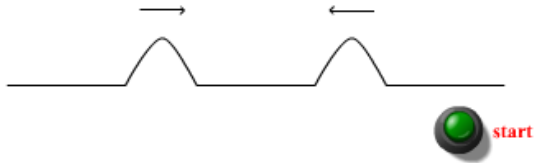
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

การแทรกสอด(Interference)

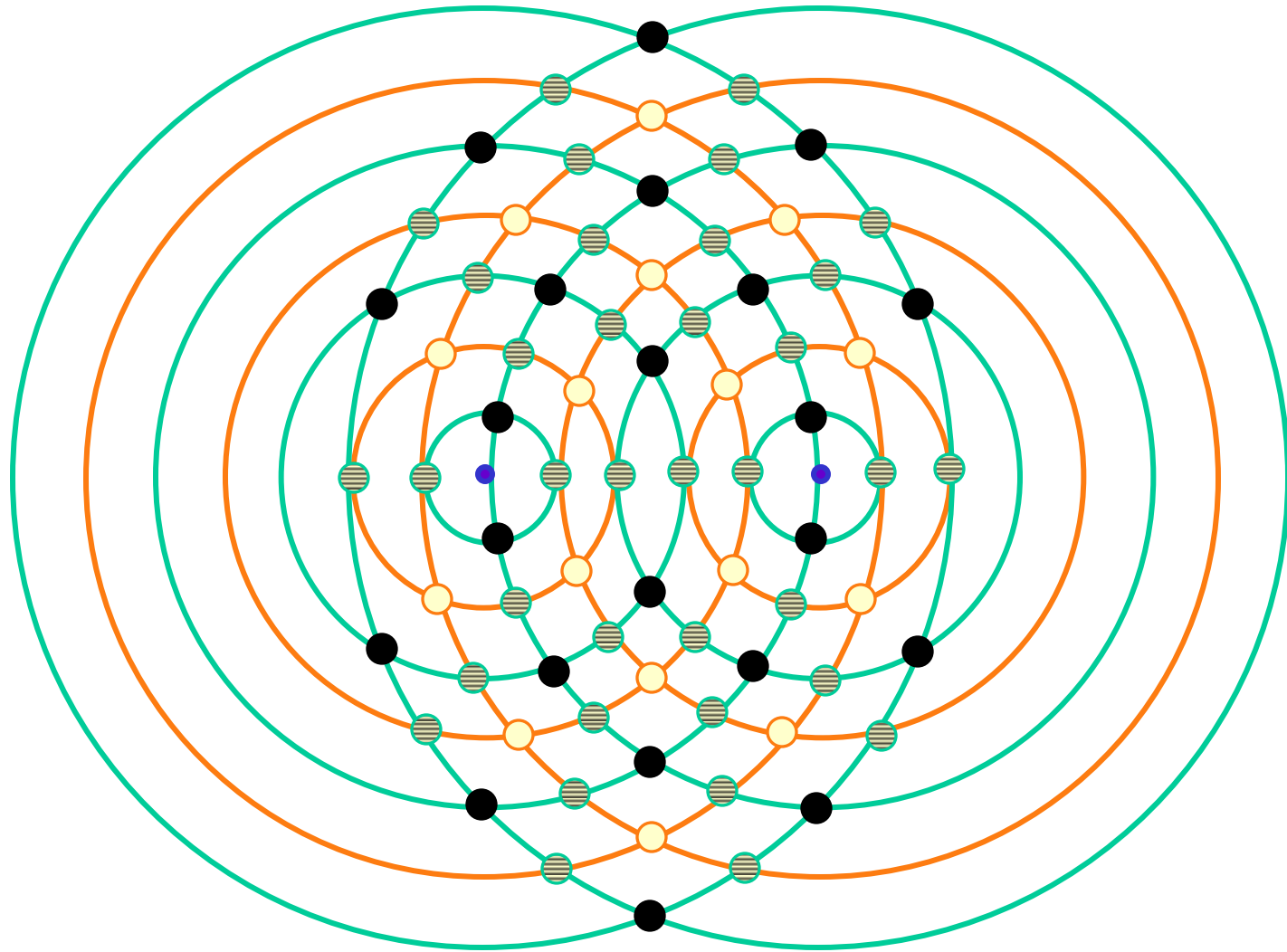
“คลื่นตั้งแต่ 2 ขบวนขึ้นไป เคลื่อนที่มาพบกันในตัวกลางเดียวกัน แล้วเกิดการรวมกันตามหลักการรวมกันของคลื่น”



การซ้อนทับกันของคลื่น (superposition)



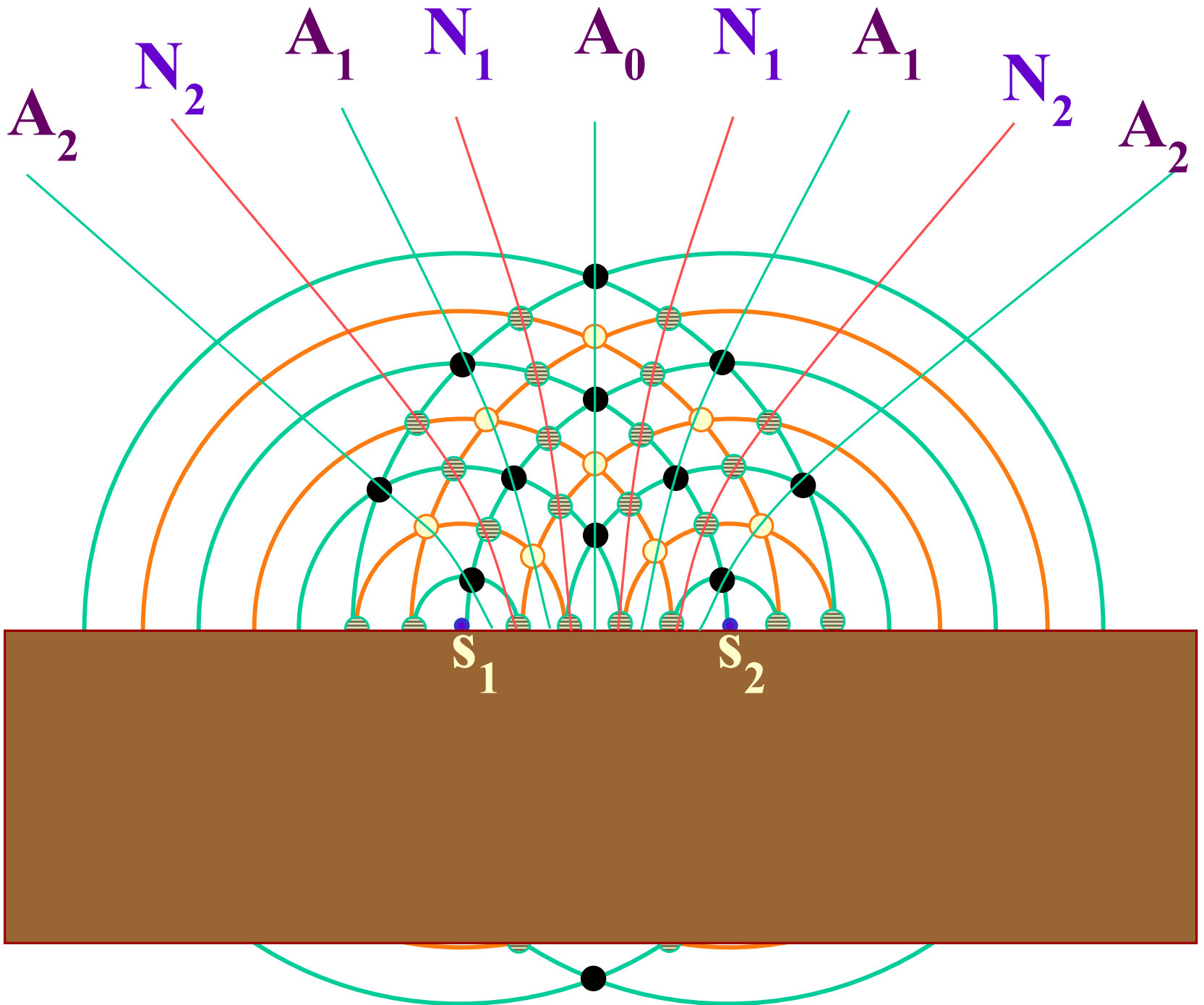
- สันคลื่น + สันคลื่น
 - ท้องคลื่น + ท้องคลื่น
 - สันคลื่น + ท้องคลื่น
- สันคลื่น
— ท้องคลื่น

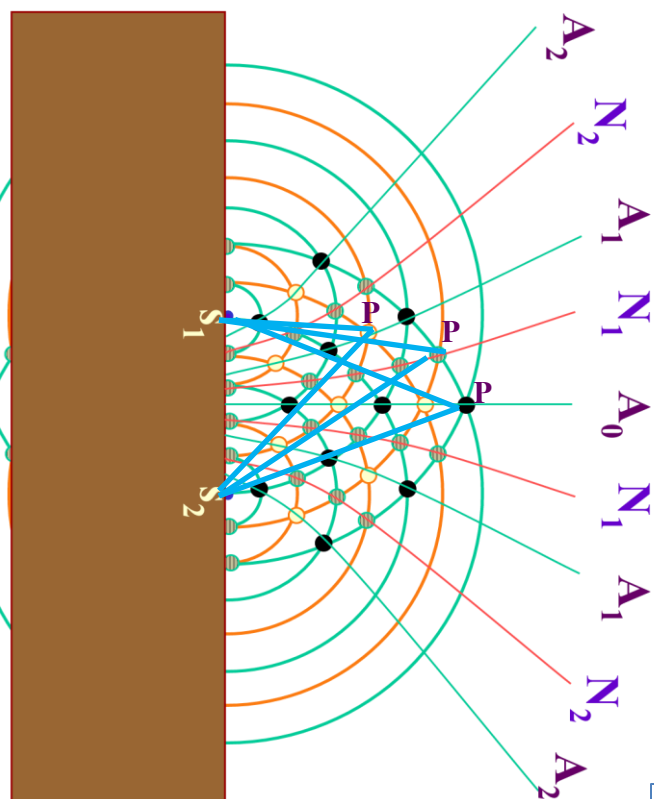
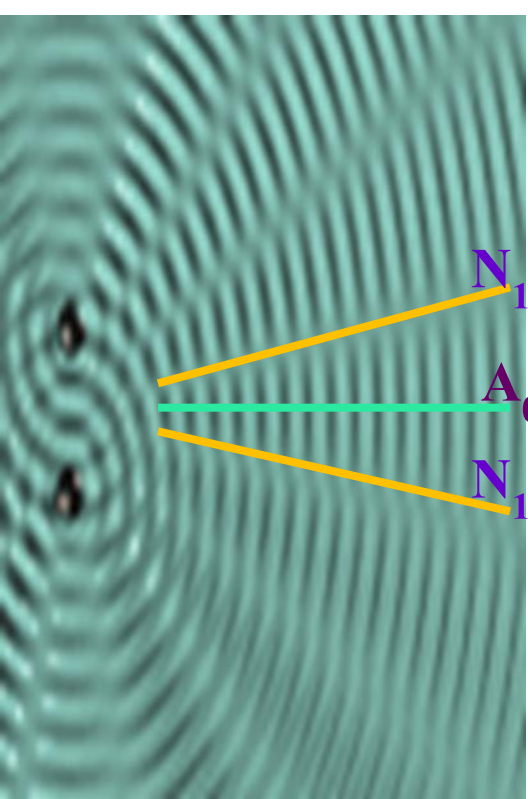


- สันคลื่น+สันคลื่น
- ท้องคลื่น+ท้องคลื่น
- ◐ สันคลื่น+ท้องคลื่น

สันคลื่นตรงกับสันคลื่นหรือท้องคลื่นตรงกับท้องคลื่น
เรียก “การแทรกสอดแบบเสริมหรือปฏิบัพ(Antinode)”

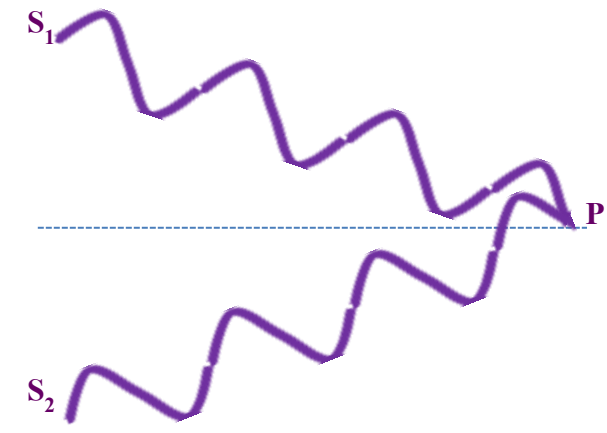
สันคลื่นหนึ่งตรงกับท้องคลื่นอีกแหล่งกำเนิดหนึ่ง
เรียก “การแทรกสอดแบบหักล้างหรือบัพ(Node)”





แหล่งกำเนิดอาพันธ์

- ❖ ความถี่เท่ากัน
- ❖ มีเฟสตรงกันหรือต่างกันคงตัว



ถ้า P อยู่บนเส้นปฏิบัพ A_0 จะได้ Path difference $|S_1 P - S_2 P| = |3\frac{1}{2}\lambda - 3\frac{1}{2}\lambda| = 0\lambda$
 ถ้า P อยู่บนเส้นปฏิบัพ A_1 จะได้ Path difference $|S_1 P - S_2 P| = |2\lambda - 3\lambda| = 1\lambda$
 ถ้า P อยู่บนเส้นปฏิบัพ A_2 จะได้ Path difference $|S_1 P - S_2 P| = |1\frac{1}{2}\lambda - 3\frac{1}{2}\lambda| = 2\lambda$

- แนวปฏิบัพลำดับที่ 0
- แนวปฏิบัพลำดับที่ 1
- แนวปฏิบัพลำดับที่ 2

$$|S_1 P - S_2 P| = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

ถ้า P อยู่บนเส้นบัพ N_1 จะได้ Path difference $|S_1 P - S_2 P| = |3\lambda - 3\frac{1}{2}\lambda| = \frac{1}{2}\lambda$
 ถ้า P อยู่บนเส้นบัพ N_2 จะได้ Path difference $|S_1 P - S_2 P| = |2\lambda - 3\frac{1}{2}\lambda| = \frac{3}{2}\lambda$

- แนวบัพลำดับที่ 1
- แนวบัพลำดับที่ 2

$$|S_1 P - S_2 P| = (n - \frac{1}{2})\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

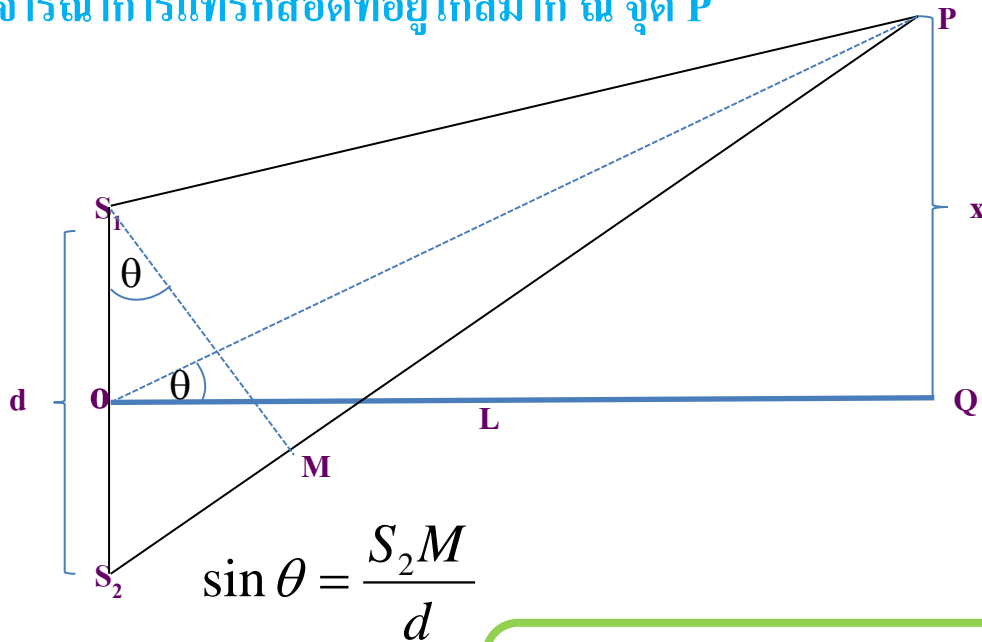
การแทรกสอดแบบเสริม ผลต่างของเส้นทางเดินมีค่าเป็นจำนวนเต็มเท่าของความยาวคลื่น

$$|S_1 P - S_2 P| = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง ผลต่างของเส้นทางเดินมีค่าเป็นจำนวนครึ่งเท่าของความยาวคลื่น

$$|S_1 P - S_2 P| = (n - \frac{1}{2})\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

พิจารณาการแทรกสอดที่อยู่ไกลมาก ณ จุด P



ถ้าจุด P เป็นตำแหน่งปฏิบัพ

$$|S_1 P - S_2 P| = n\lambda$$

$$|S_2 M| = n\lambda$$

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

พิจารณา $\triangle POQ$; กรณีมุมเล็กๆ

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

$$|S_1 P - S_2 P| = d \sin \theta = d \frac{x}{L} = n\lambda$$

สรุปเงื่อนไขการแทรกสอด

การแทรกสอดแบบเสริม

$$|S_1P - S_2P| = d \sin \theta = d \frac{x}{L} = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง

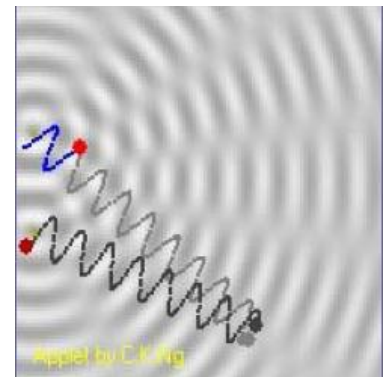
$$|S_1P - S_2P| = d \sin \theta = d \frac{x}{L} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

การแทรกสอดแบบเสริม

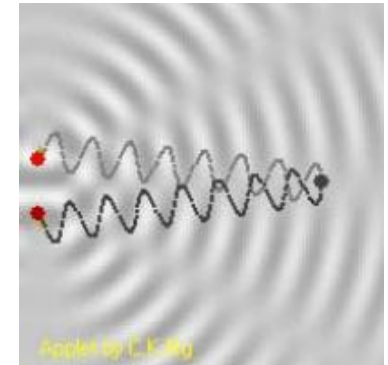
$$|S_1P - S_2P| = d \sin \theta = d \frac{x}{L} = \left(n - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

การแทรกสอดแบบหักล้าง

$$|S_1P - S_2P| = d \sin \theta = d \frac{x}{L} = n\lambda \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$



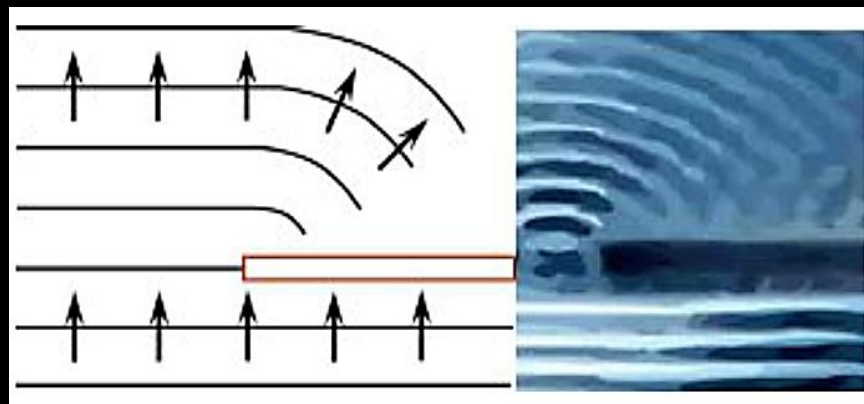
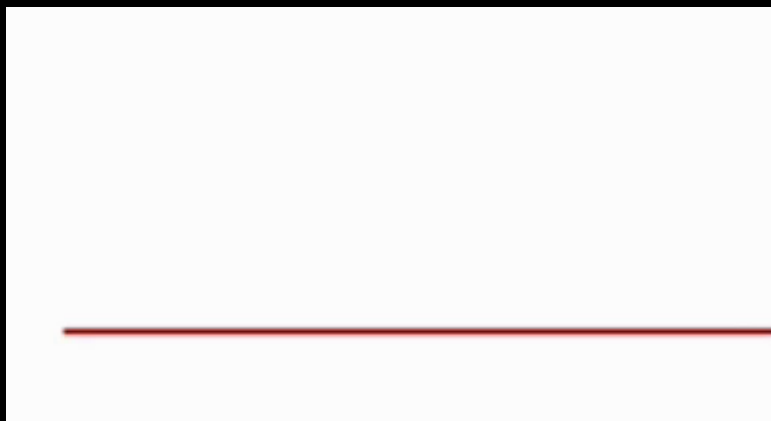
แหล่งกำเนิด 2 แหล่งเฟสตรงกัน



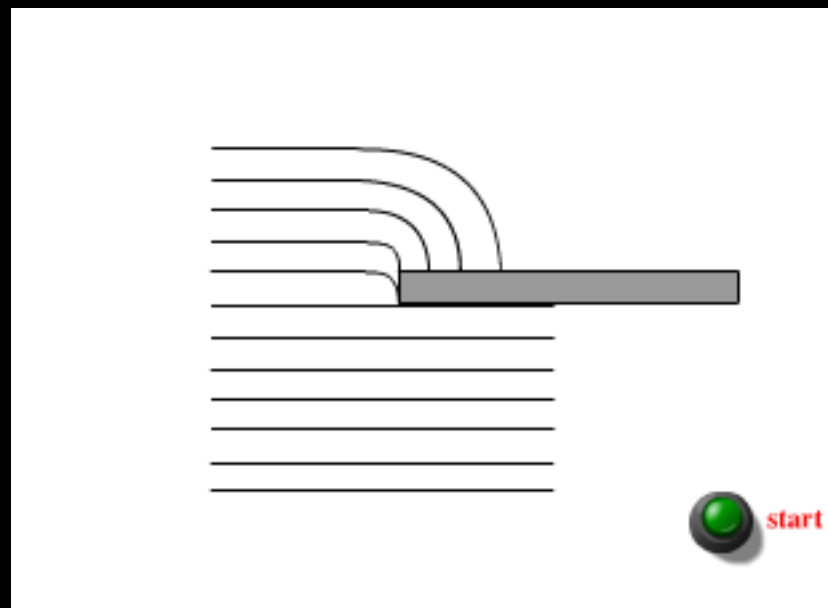
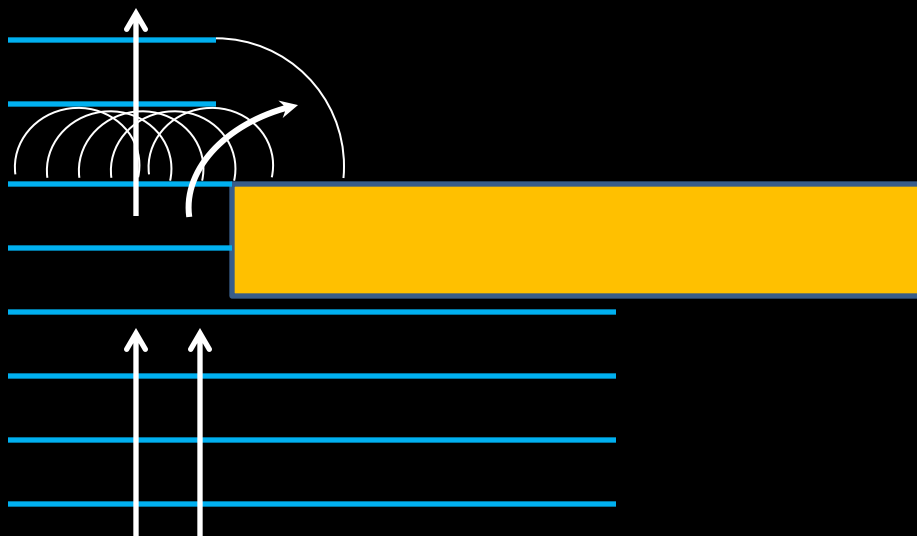
แหล่งกำเนิด 2 แหล่งเฟสตรงข้าม

การเลี้ยวเบน (Diffraction)

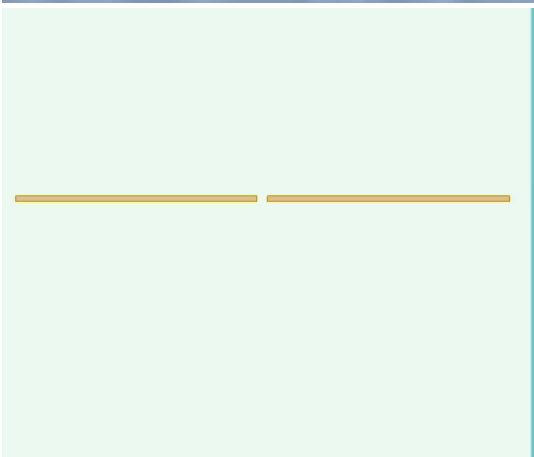
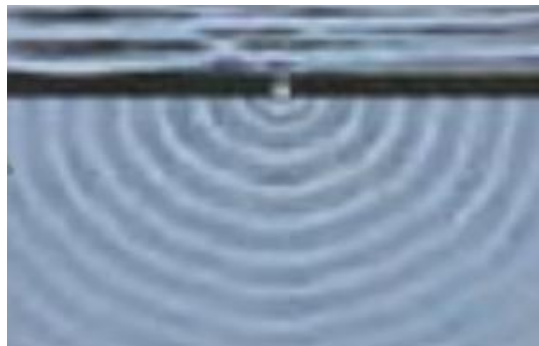
“ปรากฏการณ์ที่คลื่นสามารถแผ่จากขอบของสิ่งกีดขวางไปทางด้านหลังของสิ่งกีดขวางได้”



หลักของฮอยเกนส์ “ทุกๆ จุดบนหน้าคลื่นสามารถประพฤติตัวเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นใหม่ได้”



การเลี้ยวเบนของคลื่นผิวน้ำที่มีความยาวคลื่นคงตัวแต่ความกว้างช่องเปิดต่างกัน



$$d < \lambda$$

$$d \approx \lambda$$

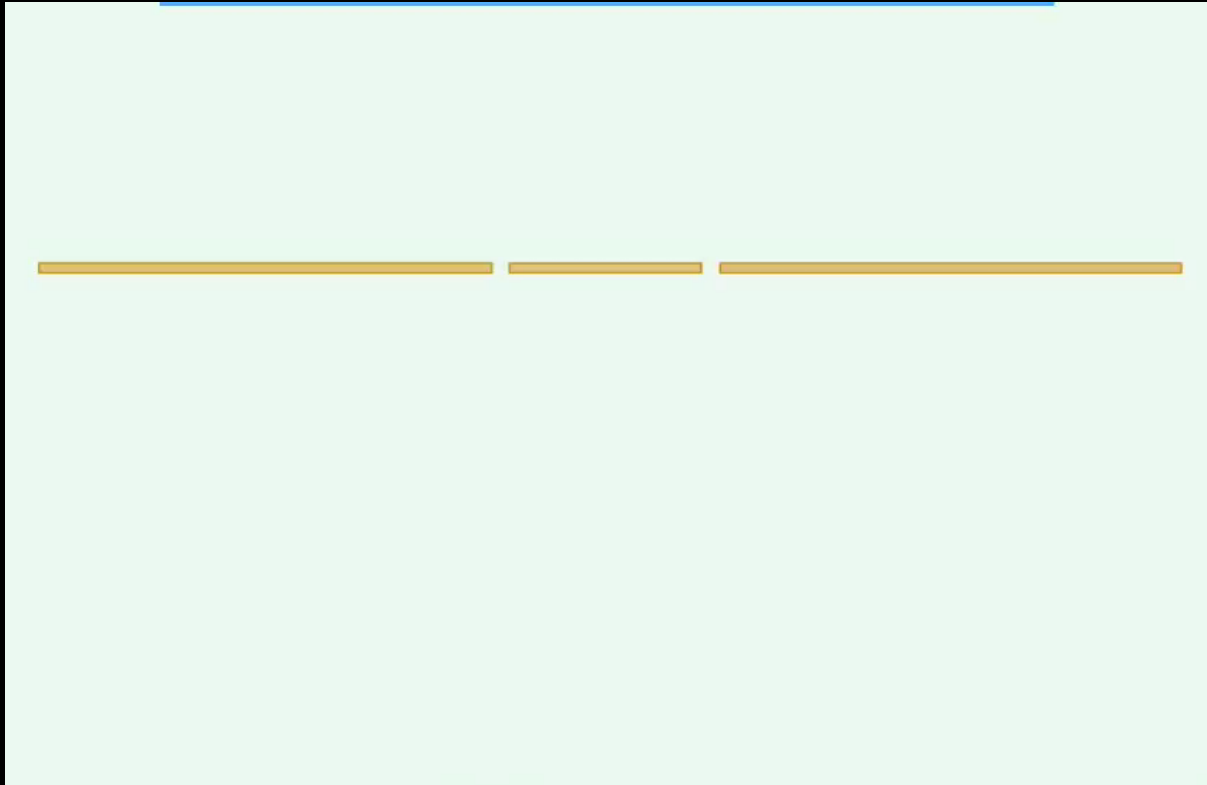
$$d \gg \lambda$$

คลื่นเคลื่อนที่ผ่านช่องแคบ จะเกิดการเลี้ยวเบนขึ้นมากหรือน้อยขึ้นกับขนาดความกว้างของช่องและความยาวคลื่น

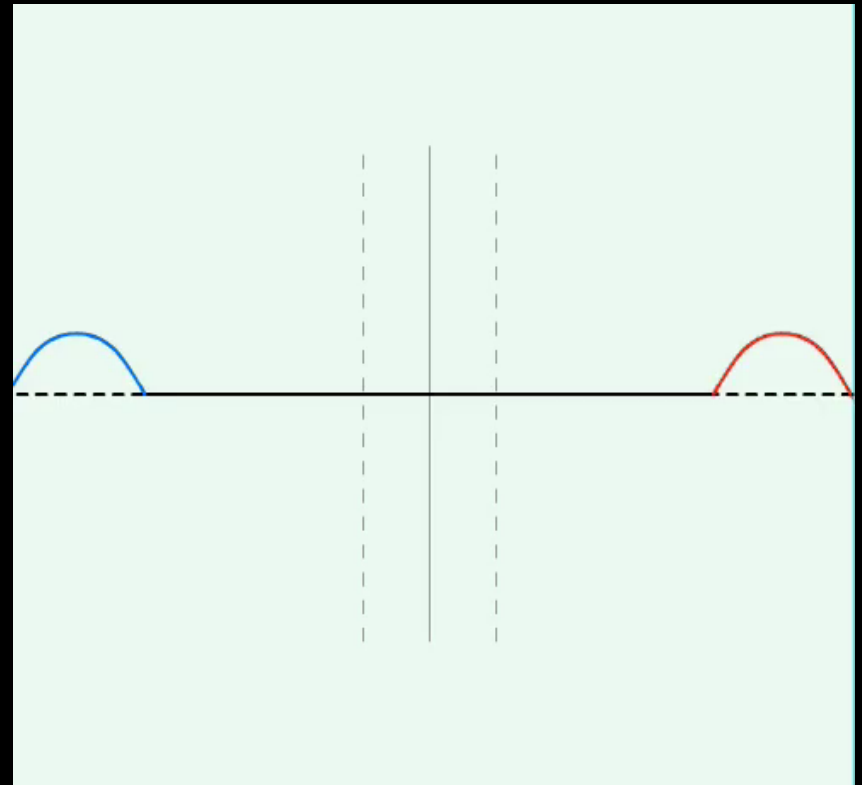
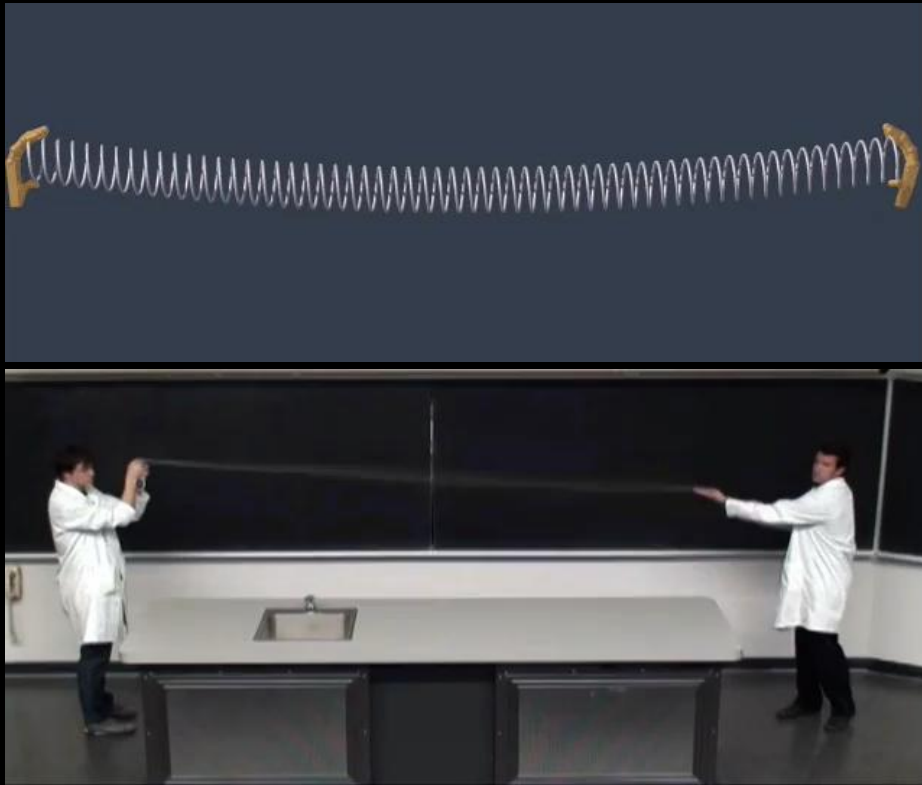
$d < \lambda$ คลื่นจะแผ่เหมือนเป็นแหล่งกำเนิดคลื่นวงกลม

“ถ้าทำให้สิ่งกีดขวางเป็นช่องเปิดเล็กๆ จะสังเกตการเลี้ยวเบนของคลื่นได้ชัดเจน เรียกช่องเปิดเล็กๆ ว่า สลิต”

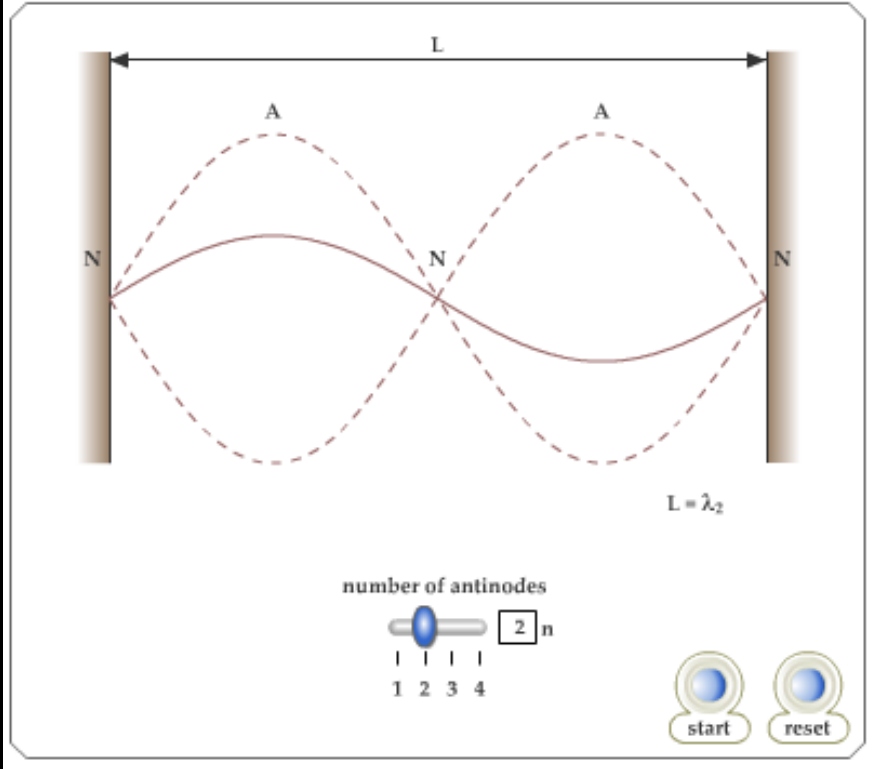
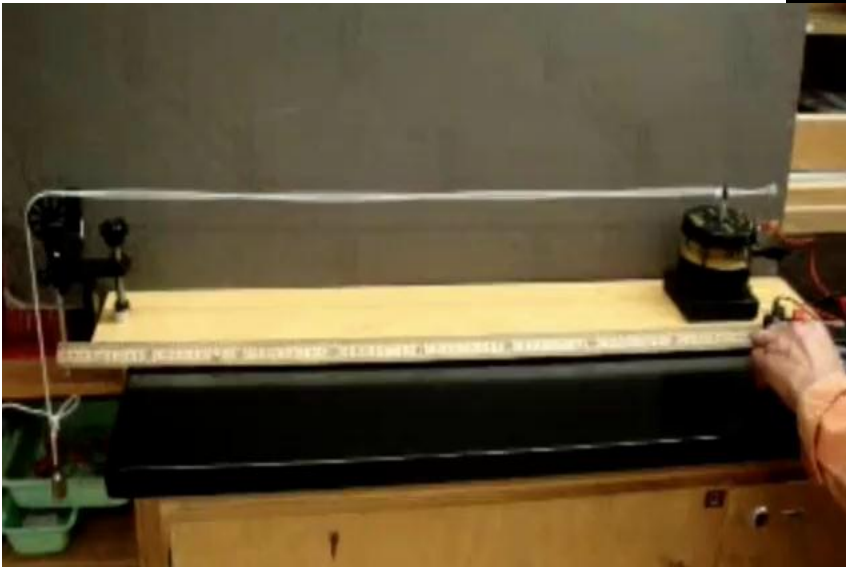
“การเลี้ยวเบนผ่านช่องแคบคู่เล็กๆ แล้วทำให้เกิดแหล่งกำเนิดใหม่แทรกสอดกัน”



คลื่นนิ่ง(Standing waves)



“ตำแหน่งที่เชือกไม่สั่นและมีตำแหน่งที่เชือกสั่นมากที่สุด เรียกรูปแบบของการสั่นที่ไม่ได้เคลื่อนที่ไปทางซ้ายหรือทางขวาและมีตำแหน่งบางตำแหน่งที่อยู่นิ่งหรืออยู่กับที่นี้ว่าคลื่นนิ่ง **standing waves**”



ตำแหน่งที่เชือกไม่สั่น เรียกว่า **บัพ (Node)**

ตำแหน่งที่เชือกสั่นมากที่สุด เรียกว่า **ปฏิบัพ (Antinode)**

กำหนดให้ **n** คือ จำนวนวงปิด หรือจำนวนลูป หรือเลขอันดับของโหมดการสั่น

กำหนดให้ **L** คือ ความยาวเชือก

คลื่นนิ่งในเส้นเชือกที่มีปลายตรึงทั้งสองข้าง

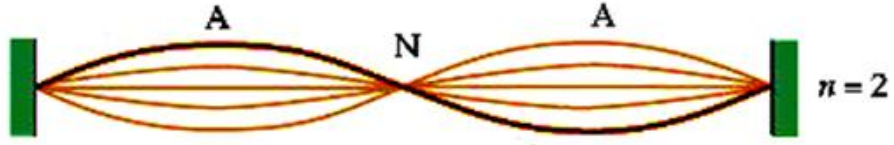
$$f = \frac{v}{\lambda}$$



$n=1$

$$L = \frac{\lambda_1}{2}$$

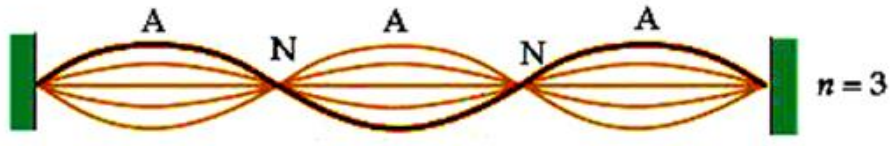
$$f = \frac{v}{2L}$$



$n=2$

$$L = \frac{2}{2} \lambda_2$$

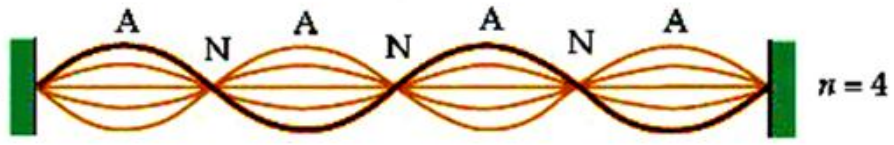
$$f = \frac{2v}{2L}$$



$n=3$

$$L = \frac{3}{2} \lambda_3$$

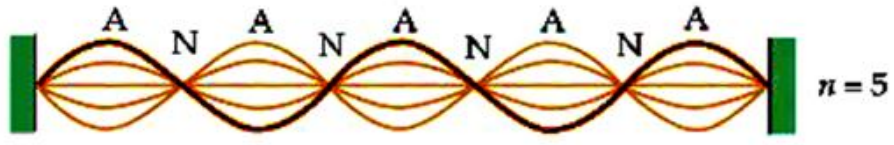
$$f = \frac{3v}{2L}$$



$n=4$

$$L = \frac{4}{2} \lambda_4$$

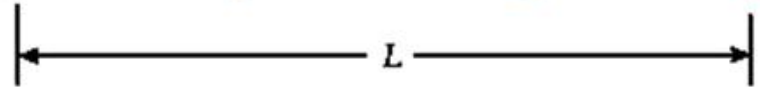
$$f = \frac{4v}{2L}$$



$n=5$

$$L = \frac{5}{2} \lambda_5$$

$$f = \frac{5v}{2L}$$



$$L = \frac{n}{2} \lambda_n$$

$$f = \frac{nv}{2L}$$

ความถี่ของคลื่นนิ่งในเส้นเชือก
(resonant Frequencies)

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{\left(\frac{2L}{n}\right)} = \frac{nv}{2L}$$