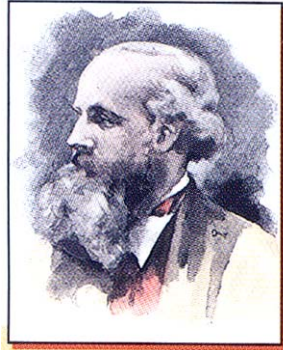


บทที่ 9

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์

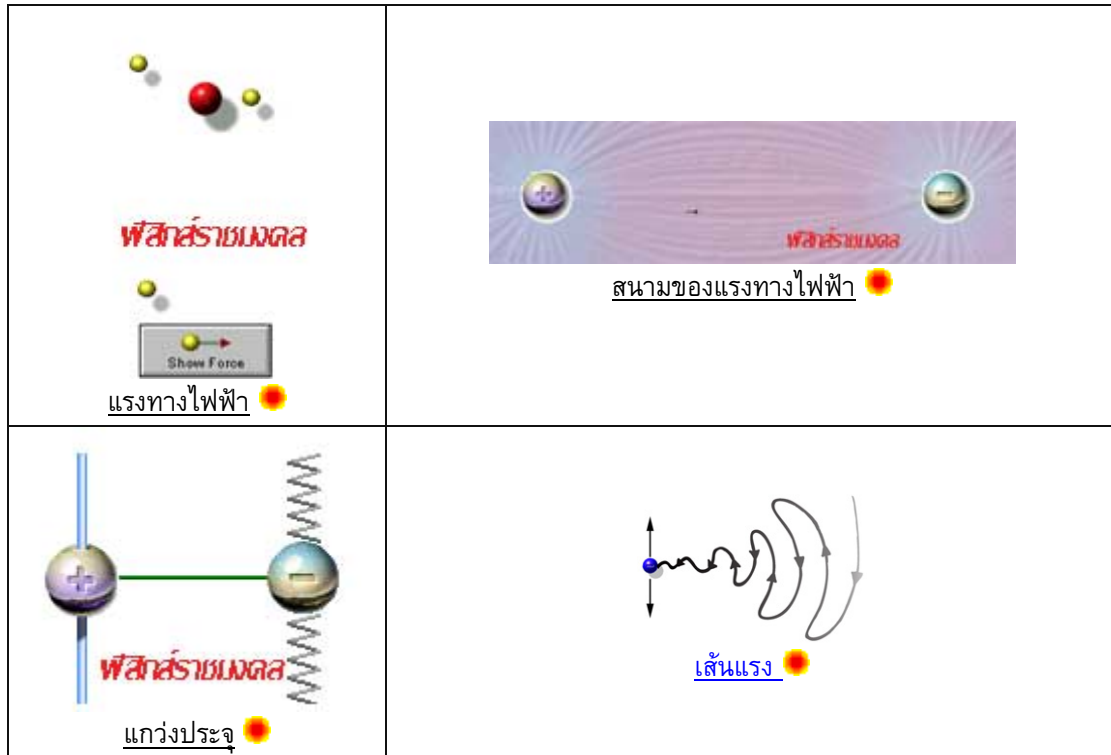
แมกซ์เวลล์เกิดเมื่อวันที่ 13 พฤศจิกายน ค.ศ. 1831 ที่เอดิเนเบิร์ก ประเทศสกอตแลนด์ ในตระกูลที่ร่ำรวยและมีชื่อเสียงมาก หลังจากที่แมกซ์เวลล์จบการศึกษาขั้นต้นแล้ว เขาได้เข้าเรียนต่อวิชาฟิสิกส์ที่มหาวิทยาลัยเอดิเนเบิร์ก (Edinburg University) ในระหว่างที่เขาศึกษาอยู่ที่นี่ เขาได้รู้จักกับนักฟิสิกส์ท่านหนึ่งชื่อนายวิลเลียม นิคอน (William Nikon) ซึ่งกำลังสนใจเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวกับแสงเพื่อใช้สำหรับการถ่ายภาพจากการค้นคว้าร่วมกันทำให้แมกซ์เวลล์ได้พบว่าแม่สีของแสงมี 3 สี ได้แก่ แสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งทฤษฎีนี้ได้นำมาใช้เกี่ยวกับการอัดภาพสี [คลิกอ่านต่อครับ](#) 🌟

9-1 ทฤษฎีเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การทดลองเสมือนจริง

 <p><u>คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า</u> 🌟</p>	 <p><u>คลื่นน้ำ</u> 🌟</p>	 <p><u>คลื่นบนสแตนเชียร์</u> 🌟</p>
--	--	--





สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่กล่าวมา เป็นสนามที่มีลักษณะสถิต กล่าวคือจะมีค่าคงที่เสมอไม่ขึ้นอยู่กับเวลา ขนาดของสนามจะแปรค่าไปตามระยะทางจากแหล่งกำเนิดสนามไปยังตำแหน่งที่ต้องการหาสนามนั้น ในยุคก่อนนั้นเชื่อกันว่าปรากฏการณ์ไฟฟ้าและแม่เหล็กเป็นปรากฏการณ์ที่แยกจากกันอย่างเด็ดขาด จนถึง ค.ศ. 1865 เจมส์ คลาร์ก แมกซ์เวลล์ (James Cleark Maxwell) ได้เสนอสมการเกี่ยวกับทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า 4 สมการ และยังทำนายด้วยว่าสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า สามารถเดินทางร่วมกันในอวกาศได้ เรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งในสมัยนั้นยังไม่มีนักค้นพบคลื่นวิทยุ และยังไม่มีการพบว่าแสงก็จัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง

แมกซ์เวลล์ ได้พบ หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับ สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าและสรุปรวมเป็นสมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) 4 สมการ ดังต่อไปนี้

$$\text{กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า} \quad \oint_s \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (9-1)$$

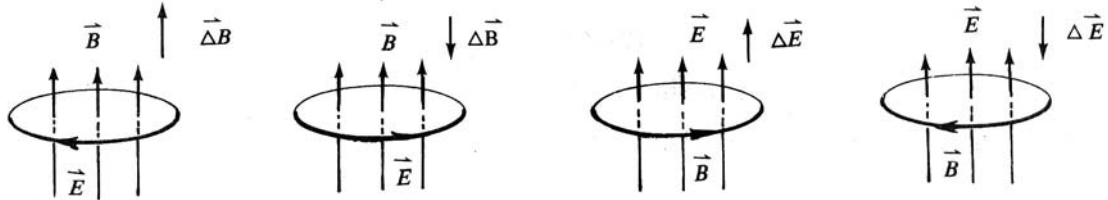
$$\text{กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก} \quad \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (9-2)$$

$$\text{กฎการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้าของฟาราเดย์} \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (9-3)$$

$$\text{กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์} \quad \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \right) \quad (9-4)$$



ทฤษฎี เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ อธิบายแนวคิดเกี่ยวกับแม่เหล็กไฟฟ้าได้ ว่า เมื่อสนามแม่เหล็กในบริเวณหนึ่งเปลี่ยนแปลง $\Delta \vec{B}$ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้า \vec{E} โดยสนามไฟฟ้าที่ถูกเหนี่ยวนำจะมีระนาบตั้งฉากกับทิศของสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลง และเช่นเดียวกัน สนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง $\Delta \vec{E}$ จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามแม่เหล็ก \vec{B} ในระนาบตั้งฉากกับสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลง



รูป 9-1 การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กกับสนามไฟฟ้า

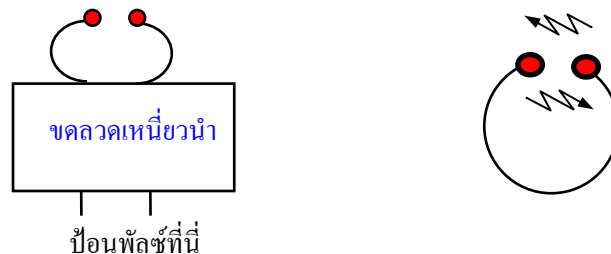
9-2 การทดลองของเฮิร์ตซ์

บทความออนไลน์



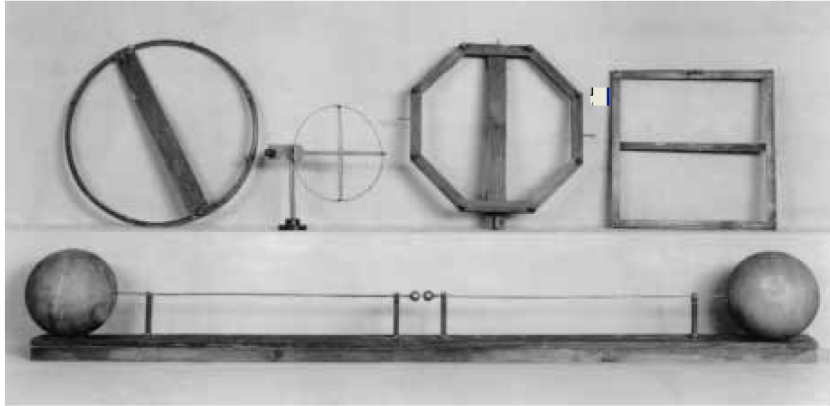
กุกลิเอลโม มาร์โคนี เกิดเมื่อปี 1874 ที่โบโลนา ในประเทศอิตาลี มีบิดาเป็นชาวอิตาลีและมารดาเป็นชาวไอริช เขาได้รับแรงดลใจจากการค้นพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของคลาร์ก แมกซ์เวลล์ และการทดลองการส่งกระแสไฟฟ้าผ่านเส้นลวดของไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ [คลิกอ่านต่อครับ](#) 🌟

หลังจากแมกซ์เวลล์ได้เสนอสมการแมกซ์เวลล์ 4 สมการและทำนายว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีจริง ผู้ที่ตรวจวัดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคนแรกที่ยืนยันคำทำนายของแมกซ์เวลล์คือ ไฮน์ริช เฮิร์ตซ์ (Heinrich Hertz) โดยทดลองในปี ค.ศ. 1887



รูป 9-2 แผนภาพแสดงอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองของเฮิร์ตซ์



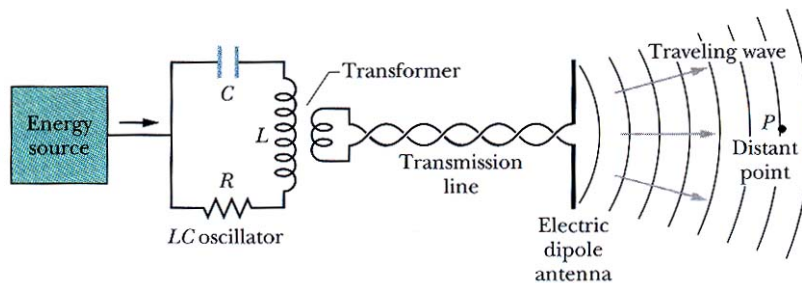


รูป 9-3 อุปกรณ์การทดลองของเฮิร์ตซ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยขดลวดเหนี่ยวนำเชื่อมต่อกับโลหะทรงกลม 2 ลูก ซึ่งวางใกล้กันมาก จะทำหน้าที่คล้ายกับเป็นตัวเก็บประจุ อุปกรณ์ชุดนี้ทำหน้าที่เป็นวงจร LC ของเครื่องส่งคลื่นวิทยุ การกวัดแกว่ง (oscillate) ของคลื่นเกิดขึ้นได้โดยป้อนความต่างศักย์เป็นคลื่นช่วงสั้น ๆ (pulse) เข้าไปที่ขดลวดตัวนำ จะเกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ประมาณ 100 MHz จากนั้นเฮิร์ตซ์สร้างวงจรขึ้นมามีอีกวงหนึ่ง ประกอบด้วยขดลวดเพียงขดเดียว ที่ปลายขดลวดมีทรงกลมตัวนำวางไว้ใกล้ ๆ กัน วงจรชุดนี้ทำหน้าที่คล้ายเครื่องรับคลื่น เฮิร์ตซ์พบอีกว่า วงจรรับคลื่นจะสามารถรับคลื่นได้ก็ต่อเมื่อความถี่ที่ส่งมานั้นเป็นความถี่อภินาของวงจรรับคลื่นพอดี ถ้าความต่างศักย์บนขดลวดชุดรับคลื่นมีค่าสูงจะทำให้เกิดประกายไฟกระโดดข้ามระหว่างทรงกลมทั้งสอง การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าพลังงานสามารถส่งผ่านจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่งได้โดยอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

หลังจากผลการทดลองของเฮิร์ตซ์ได้รับการตีพิมพ์ กุกลีเอลโม มาร์โคนี (Guglielmo Marconi) นักวิทยาศาสตร์ และนักประดิษฐ์ชาวอิตาลีจึงตั้งข้อสังเกตว่าการเกิดประกายไฟฟ้าโดยไม่ต้องใช้สายต่อนี้ น่าจะนำมาส่งสัญญาณประกายไฟฟ้าเป็นรหัสมอสได้ เขาจึงเป็นผู้ที่สร้างโทรเลขระบบไม่ต้องต่อสายหรือวิทยุโทรเลข ขึ้นสำเร็จ

9-3 ตัวกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



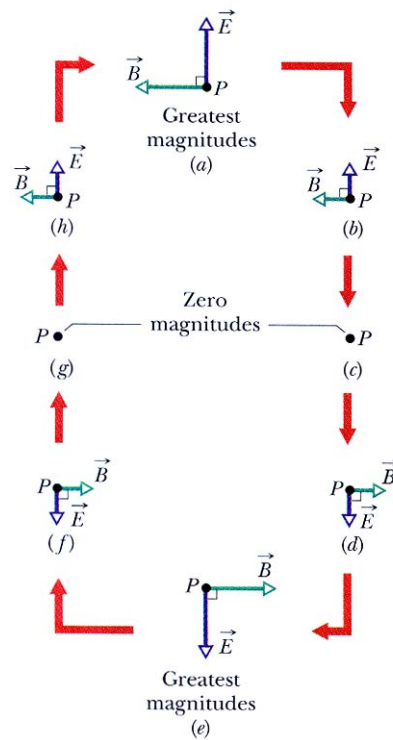
รูป 9-4 แสดงวงจรกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตัวหลักอยู่ที่ออสซิลเลเตอร์ LC ซึ่งสร้างความถี่เชิงมุม ($\omega = 1/\sqrt{LC}$) ประจุและกระแสในวงจรเปลี่ยนแปลงตามเวลาแบบคลื่นไซน์ ด้วยความถี่นี้แหล่งพลังงานจากภายนอก ซึ่งอาจจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้ากระแสสลับ จะจ่ายพลังงานเพื่อชดเชยพลังงานที่สูญเสียไปในรูปความร้อนในวงจร และพลังงานที่ออกไปโดยการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



ออสซิลเลเตอร์ LC ในรูป เชื่อมต่อกับหม้อแปลงและสายส่งสัญญาณ ไปยังสายอากาศ ซึ่งประกอบด้วยแท่งตัวนำ 2 แท่ง จากการเชื่อมต่อแบบนี้จะทำให้ประจุออสซิลเลตแบบคลื่นไซน์ตามสายอากาศด้วยความถี่เชิงมุม ω กระแสในสายอากาศซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของประจุย่อมจะเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์ (ทั้งขนาดและทิศทาง) ด้วยความถี่เชิงมุม ω เช่นเดียวกัน สายอากาศในรูป 9-2 เหมือนเป็นไดโพลไฟฟ้า คู่หนึ่งที่มีไดโพลโมเมนต์ เปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์ ทั้งขนาดและทิศทางตามความยาวของเสาอากาศ

เนื่องจากไดโพลโมเมนต์ เปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง ทำให้สนามไฟฟ้าที่เกิดจากไดโพลเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง และเนื่องจากกระแสในสายอากาศมีการเปลี่ยนแปลง ทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก

การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเช่นนี้ ทำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ออกจากสายอากาศด้วยอัตราเร็วแสง และความถี่เชิงมุมของคลื่นนี้ คือ ω ซึ่งเท่ากับความถี่เชิงมุมออสซิลเลเตอร์ LC



รูป 9-5 การเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเทียบกับเวลา

รูป 9-5 แสดงการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของสนามไฟฟ้า \vec{E} และสนามแม่เหล็ก \vec{B} ในขณะที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุด P ของรูปที่ 9-4 โดยจุด P นี้ห่างไกลจากเสาอากาศ ในรูปที่ 9-5 คลื่นกำลังเคลื่อนที่ออกจากหน้ากระดาษ (เหตุผลของการเลือกจุดที่ไกลจากสายอากาศ เพราะว่าคลื่นที่จุดนั้นสามารถถือเป็นคลื่นระนาบ ซึ่งทำให้พิจารณาได้ง่ายขึ้น)



ลักษณะสำคัญในรูป 9-5 คือ

1. \vec{E} และ \vec{B} ตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสมอ (ในรูป 9-5 คลื่นกำลังเคลื่อนที่ออกจากหน้ากระดาษ) ดังนั้น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง
2. \vec{E} ตั้งฉากกับ \vec{B} เสมอ
3. $\vec{E} \times \vec{B}$ มีทิศทางตามทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น
4. สนามทั้งสองเปลี่ยนแปลงแบบคลื่นไซน์ด้วยความถี่เดียวกัน และมีเฟสตรงกัน

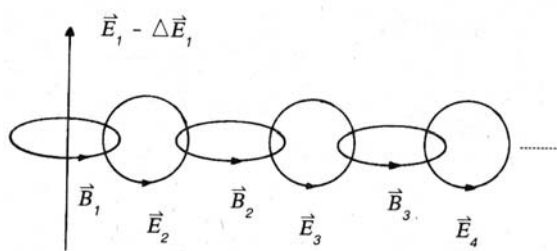
9-3-1 การแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สมการของแมกเวลล์ชี้ให้เห็นว่า เมื่อใดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีความเปลี่ยนแปลงตามเวลา สนามทั้งสองจะมีอิทธิพลต่อกัน เรียกว่าจะเกิดคู่ควบกันขึ้น การเกิดคู่ควบกันของสนามทั้งสองนี้ทำให้สามารถถ่ายโอนพลังงาน และโมเมนตัมออกไปในระยะไกลๆ เรียกการแผ่ออกไปนี้ว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นต่างๆนี้ก็แผ่กระจายอยู่ทั่วไปในชีวิตประจำวันของเรา เช่น คลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์ คลื่นไมโครเวฟ แสงสว่าง รังสีอัลตราไวโอเล็ต และรังสีเอกซ์ เป็นต้น

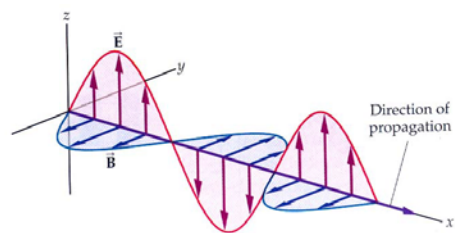
9-3-2 คำถามที่น่าสนใจคือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปได้อย่างไร?

เมื่อมีกระแส I ในตัวนำเส้นตรง จะมี สนามแม่เหล็ก \vec{B}_1 เกิดขึ้น รอบตัวนำ(ตามกฎของแอมแปร์) ดังนั้น เมื่อกระแสไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง สนามแม่เหล็ก \vec{B}_1 ก็เปลี่ยนแปลงตามกระแสไปด้วย การเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก \vec{B}_1 จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำ \vec{E}_2 (ตามกฎของฟาราเดย์) ในวงปิดบนระนาบที่ตั้งฉากกับ สนามแม่เหล็ก \vec{B}_1 และสนามเหนี่ยวนำบนวงปิดนี้ จะก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก \vec{B}_2 แผ่ออกไป การเหนี่ยวนำนี้จะเกิดต่อเนื่องไปเรื่อยๆ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ ออกห่างจากสายตัวนำตามแนวรัศมี

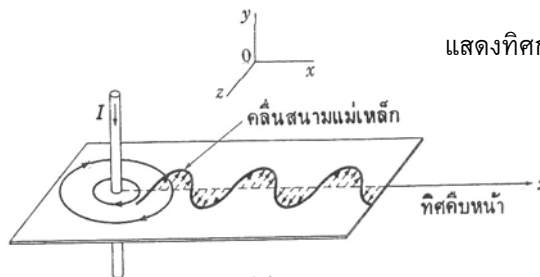
ขอให้สังเกตว่า ประจุที่ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า(คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า)เคลื่อนที่ ออกไปนั้น ประจุต้องเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง และถ้าประจุเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ออกไปก็เป็นแบบฮาร์มอนิกด้วย



ลักษณะการเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้น



แสดงทิศการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



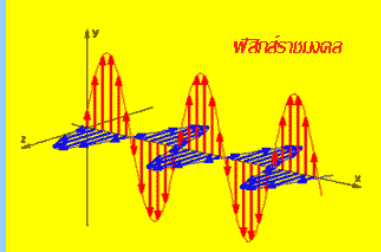
ลักษณะการแผ่ของสนามแม่เหล็กจากสายอากาศ


รูป 9-6 การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



9-4 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบระนาบ

การทดลองเสมือนจริง



ภาพเคลื่อนไหวแสดงการขึ้นลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในรูปภาพเป็น คลื่นโพลาไรซ์ ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปบนแกน $+x$ เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าแสดงด้วยลูกศรสีแดง ขนานกับแกน y ส่วนเวกเตอร์ของสนามแม่เหล็กแสดงเป็นลูกศรสีน้ำเงิน ขนานกับแกน z [คลิกครับเพื่อเข้าสู่การทดลอง](#) 

ให้พิจารณาคำคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นระนาบ กล่าวคือ เคลื่อนที่ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ในที่นี้ให้เป็นทิศทาง x และมีสนามไฟฟ้าชี้ในทิศทาง y ส่วนสนามแม่เหล็กชี้ในทิศ z ดังรูป ซึ่งสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในทิศ x จะขนานกัน ในระนาบ yz เช่นนี้ เรียกว่า เกิดการโพลาไรซ์เชิงเส้น

เราสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ B โดยใช้สมการ (9-3) และ (9-4) โดยถือว่าที่ว่างเปล่า ($Q = 0$ $i = 0$) สมการ (9-3) ยังเหมือนเดิม แต่สมการ (9-4) จะเปลี่ยนเป็น

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (9-5)$$

ใช้สมการ (9-3) และ (9-5) และสมมติฐานของคลื่นระนาบเพื่อให้เขียนสมการได้ไม่ซับซ้อนนัก จะลดตัวห้อยออก กล่าวคือ

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (9-6)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (9-7)$$

ทำการหาอนุพันธ์ลำดับที่สองของสมการ (9-6) แล้วแทนค่า (9-7) จะได้

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right) \\ \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} &= -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (9-8)$$



ในทำนองเดียวกันจะได้ว่า

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (9-9)$$

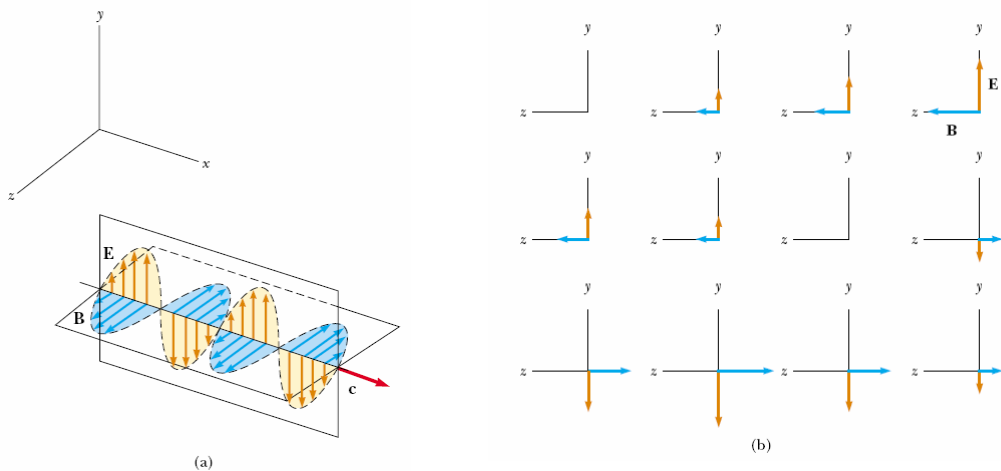
สมการ (9-8) และ (9-9) เป็นสมการคลื่นโดยที่ความเร็วของคลื่นคือ

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (9-10)$$

สมการ (9-10) เป็นผลพลอยได้จากสมการแมกซ์เวลล์เมื่อแทนค่า μ_0 และ ϵ_0 สามารถคำนวณหาความเร็วแสงได้

$$\begin{aligned} c &= \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7})(8.8542 \times 10^{-12})}} \\ &= 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

สมการ (9-8) และสมการ (9-9) เป็นสมการอนุพันธ์ซึ่งแสดงการเคลื่อนที่ของคลื่นระนาบ (plane wave) สนามแม่เหล็ก \vec{B} และสนามไฟฟ้า \vec{E} จะแปรค่าตามตำแหน่งพิกัด (x, y, z) และเวลา t แนวการเปลี่ยนแปลงของ \vec{E} และ \vec{B} จะตั้งฉากซึ่งกันและกัน และตั้งได้ฉากกับทิศการเคลื่อนที่ เพราะแนวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นมีทิศตั้งฉากซึ่งกันและกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงจัดเป็นคลื่นตามขวาง (transverse wave)



รูป 9-7 แสดงสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งขึ้นอยู่กับการพิกัด x และ t

เมื่อหาคำตอบสมการอนุพันธ์ (9-8) และ (9-9) จะได้ฟังก์ชันคลื่นระนาบที่มีความถี่ $f = \omega / 2\pi$ และ $\lambda = 2\pi / k$ ดังนี้

$$E = E_0 \sin(kx - \omega t) \quad (9-11)$$

$$B = B_0 \sin(kx - \omega t) \quad (9-12)$$



เมื่อ E_0 และ B_0 คือแอมพลิจูดของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามลำดับ ค่าคงที่ k มีค่าเท่ากับ $2\pi/\lambda$ เมื่อ λ คือความยาวคลื่น ความถี่เชิงมุม $\omega = 2\pi f$ และ f คือความถี่เป็นรอบต่อวินาที เพราะฉะนั้น $\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = c$

ถ้าเราหาอนุพันธ์บางส่วนของสมการ (9-11) และ (9-12) จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\frac{\partial E}{\partial x} &= -kE_0 \sin(kx - \omega t) \\ -\frac{\partial B}{\partial t} &= -\omega B_0 \sin(kx - \omega t)\end{aligned}$$

จากสมการ (9-6) สองปริมาณนี้จะต้องเท่ากัน ดังนั้น

$$\begin{aligned}kE_0 &= \omega B_0 \\ \frac{E_0}{B_0} &= \frac{\omega}{k} = c\end{aligned}$$

เขียนได้ว่า $\frac{E_0}{B_0} = \frac{E}{B} = c$

หรือ $E = cB$ (9-13)

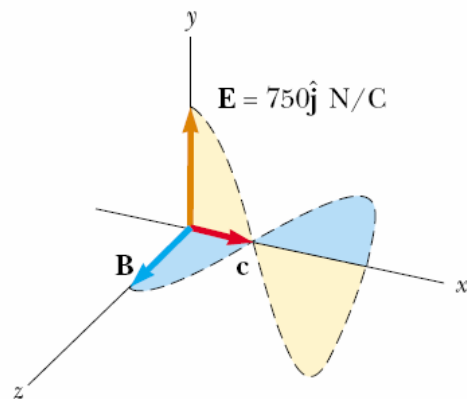
เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห

$$n|E| = c|B|$$

n คือดัชนีหักเหของตัวกลางที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าผ่านสำหรับสุญญากาศ $n = 1$

ตัวอย่าง 9-1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบคลื่นไซน์มีความถี่ 40.0 MHz เคลื่อนที่ในทิศ +x ดังรูป 9-8 ณ จุดหนึ่งเวลาใดๆ มีสนามไฟฟ้ามากที่สุดเป็น 750 N/C ตามแกน y จงหา

- ความยาวคลื่นและคาบของคลื่น
- สนามแม่เหล็ก เมื่อ สนามไฟฟ้าเท่ากับ 750 N/C ในแนวแกน y
- สมการคลื่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า



รูป 9-8 แสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



หลักการคำนวณ

ก) ความยาวคลื่นและคาบของคลื่น

เนื่องจาก

$$c = f\lambda$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.00 \times 10^8}{40.0 \times 10^6} = 7.50 \text{ m}$$

$$\tau = \frac{1}{f} = \frac{1}{40.0 \times 10^6} = 2.5 \times 10^{-8} \text{ s}$$

ข) สนามแม่เหล็ก เมื่อ สนามไฟฟ้าเท่ากับ 750 N/C ในแนวแกน y

เนื่องจาก

$$\bar{B}_0 = \frac{\bar{E}_0}{c} = \frac{750 \text{ N/C}}{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.5 \times 10^{-6} \text{ T}$$

ค) สมการคลื่นของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า

เนื่องจาก

$$\omega = 2\pi f = 8\pi \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

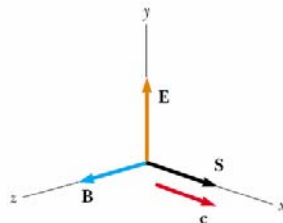
$$k = 2\pi / \lambda = 0.838 \text{ rad/m}$$

และ

$$\bar{E} = \bar{E}_0 \cos(kx - \omega t) = 750 \cos(0.838x - 8\pi \times 10^{-7} t)$$

$$\bar{B} = \bar{B}_0 \cos(kx - \omega t) = 2.5 \times 10^{-6} \cos(0.838x - 8\pi \times 10^{-7} t)$$

9-5 พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รูป 9-9 พอยน์ติงเวกเตอร์ \vec{S} มีทิศเดียวกับการเคลื่อนที่ของคลื่น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถนำพาพลังงานและถ่ายโอนพลังงานไปให้กับวัตถุที่คลื่นตกกระทบ อัตราการนำพาพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ อธิบายได้ในเทอมของเวกเตอร์ \vec{S} ที่เรียกกันว่า พอยน์ติงเวกเตอร์ (Poynting's vector) นิยามของเวกเตอร์ \vec{S} คือ

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (9-14)$$

หน่วยของพอยน์ติงเวกเตอร์ในระบบเอสไอ คือ วัตต์ต่อตารางเมตร (W/m^2) ทิศของพอยน์ติงเวกเตอร์อยู่ในทิศการเคลื่อนที่ของคลื่น ขนาดของพอยน์ติงเวกเตอร์ คือ

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB \quad (9-15)$$

(เนื่องจาก $\vec{E} \perp \vec{B}$ ดังนั้นขนาดของ $\vec{E} \times \vec{B}$ คือ EB)

S , E และ B ในสมการ (9-15) เป็นค่าขณะใดๆ จากสมการ $B = E/c$



ดังนั้นสมการ (9-15) เขียนใหม่ได้เป็น

$$S = \frac{1}{c\mu_0} E^2 \quad \text{หรือ} \quad S = \frac{c}{\mu_0} B^2 \quad (9-16)$$

ในทางปฏิบัติ เราสนใจค่าเฉลี่ยตามเวลาของ S ซึ่งแทนด้วย \bar{S} ค่าเฉลี่ยของ S เรียกอีกอย่างได้ว่า ความเข้ม I ของคลื่นดังนั้น

$$I = \bar{S} = \frac{1}{c\mu_0} \bar{E}^2 = \frac{1}{c\mu_0} E_0^2 \overline{\sin^2(kx - \omega t)}$$

ค่าเฉลี่ยของ $\sin^2(kx - \omega t)$ หรือ $\overline{\sin^2(kx - \omega t)}$ ใน 1 รอบ คือ $\frac{1}{2}$

จากสมการ $E_0 = cB_0$

$$\text{ดังนั้น} \quad I = \bar{S} = \frac{1}{2c\mu_0} E_0^2 = \frac{1}{2\mu_0} E_0 B_0 \quad (9-17)$$

เรานิยามค่า root-mean-square ของสนามไฟฟ้า หรือ E_{rms} ว่า

$$E_{rms} = E_0 / \sqrt{2}$$

ดังนั้นสมการ (9-17) เขียนใหม่ได้เป็น

$$I = \bar{S} = \frac{1}{c\mu_0} E_{rms}^2 = \frac{1}{\mu_0} E_{rms} B_{rms}$$

ตัวอย่าง 9-2 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ระยะห่าง 10 m จากแหล่งกำเนิดแสงเป็นจุด คือ 3.0 V/m จงหา

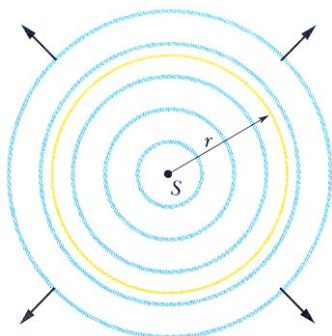
- ค่าสูงสุดของสนามแม่เหล็ก
- ความเข้มเฉลี่ยของแสง ณ จุดนั้น
- กำลังของแหล่งกำเนิดแสง

หลักการคำนวณ

$$\text{ก) จากสมการ} \quad B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{3.0 \text{ V/m}}{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1.0 \times 10^{-8} \text{ T}$$

$$\begin{aligned} \text{ข) จากสมการ} \quad I &= \frac{E_0^2}{2c\mu_0} = \frac{(3.0 \text{ V/m})^2}{2(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})(4\pi \times 10^{-7} \text{ T}\cdot\text{m/A})} \\ &= 1.2 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

ค)

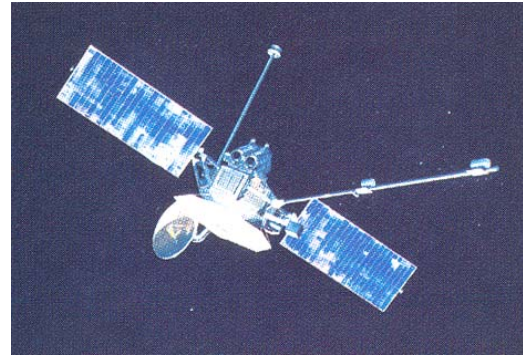
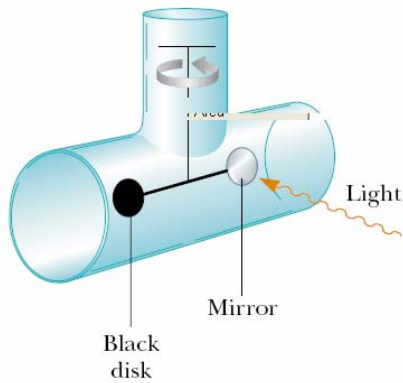


รูป 9-10 แหล่งกำเนิดคลื่น S ปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกอย่างสม่ำเสมอทุกทิศทุกทาง เป็นรูปทรงกลมรัศมี r

$$\begin{aligned} P &= 4\pi r^2 I = 4\pi (10\text{m})^2 (1.2 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2) \\ &= 15.1 \text{ W} \end{aligned}$$



9-6 โมเมนตัมและความดันของการแผ่รังสี



รูป 9-11 อุปกรณ์ตรวจวัดความดันของแสง ทั้งหมดบรรจุอยู่ในระบบสูญญากาศ

รูป 9-12 ยานอวกาศ มาร์ิเนอร์ 10 ใช้แผ่รังสีแสงอาทิตย์ ทำให้เกิดแรงขับเคลื่อน เคลื่อนที่ไปในอวกาศ

บทความออนไลน์



ฟิสิกส์ราชมงคล จะเปิดเผยกลไกของเรือใบสุริยะ เพื่อจะนำเราไปสู่ห้วงอวกาศอันไกลโพ้น ซึ่งถ้าเราใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงเหลว แบบเดียวกับจรวด หรือ กระสวยอวกาศ คงจะไปไม่ได้ไกล และ ไปไม่ถึง เพราะเชื้อเพลิงหมดเสียก่อน [ในหน้าถัดไป](#) ☀

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีการส่งถ่ายโมเมนตัมเช่นเดียวกับการส่งพลังงาน ดังนั้นความดันที่ตกลงบนผิวเมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตกกระทบผิวนั้น สมมติว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าส่งถ่ายพลังงาน U ให้กับผิวในเวลา t ถ้าผิวนั้นดูดกลืนพลังงานตกกระทบทั้งหมด U ในเวลานั้น จะปรากฏว่าโมเมนตัมทั้งหมด p ที่ได้รับบนผิวนั้นมีค่า

$$p = \frac{U}{c}$$



ให้พอยน์ติงเวกเตอร์แทนด้วย \vec{S} ความดันของการแผ่รังสีเป็น \vec{P} (แรงต่อหน่วยพื้นที่) กระทำต่อผิวที่ดูดกลืนรังสีหมด คือ

$$\vec{P} = \frac{\vec{S}}{c} \quad (9-18)$$

ตัวอย่างของวัตถุที่ดูดกลืนรังสีหมดได้แก่วัตถุดำ (black body)

ในทางตรงกันข้ามถ้าผิวเป็นผิวสะท้อนอย่างสมบูรณ์ค่าโมเมนตัมของรังสีตกกระทบตั้งฉากจะมีค่าเป็น

$$P = \frac{2U}{c}$$

โมเมนตัมที่ถ่ายส่งให้กับผิวที่มีค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะหั่นค่าโมเมนตัมจะอยู่ระหว่าง $\frac{U}{c}$ กับ $\frac{2U}{c}$ ทั้งนี้ขึ้นกับสมบัติของผิว ในที่สุดความดันการแผ่รังสีที่ตกกระทบผิวที่สะท้อนร้อยเปอร์เซ็นต์คือ

$$\vec{P} = \frac{2\vec{S}}{c}$$

ตัวอย่าง 9-3 ดวงอาทิตย์ส่องฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าขนาด 1000 W/m^2 ลงสู่ผิวโลก ก) จงคำนวณกำลังทั้งหมดที่ตกกระทบตั้งฉากหลังคาขนาด $8.0 \times 20.0 \text{ m}$ ข) จงคำนวณหาความดันการแผ่รังสี และแรงการแผ่รังสี โดยถือว่าหลังคาปกคลุมด้วยวัสดุดูดกลืนที่สมบูรณ์

หลักการคำนวณ

ก) ขนาดพอยน์ติงเวกเตอร์ คือ 1000 W/m^2 ฉะนั้นกำลังทั้งหมดที่หลังคาได้รับ

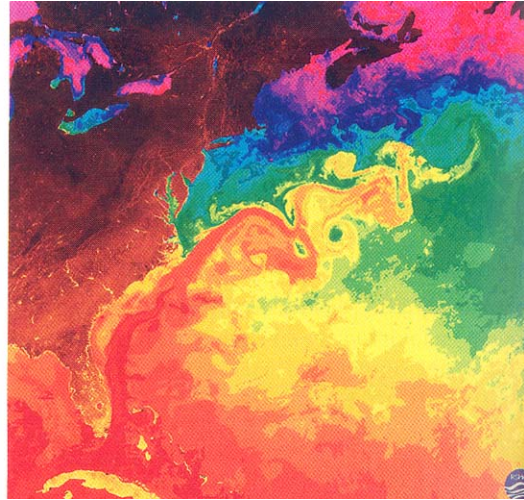
$$\begin{aligned} P &= SA = (1000)(8.0)(20.0) \\ &= 1.60 \times 10^5 \text{ W} \end{aligned}$$

ข) จากสมการ (9-18) โดย $s = 1000 \text{ W/m}^2$

$$\begin{aligned} P &= \frac{S}{c} = \frac{1000}{3 \times 10^8} = 3.00 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2 \\ F &= PA = (3.33 \times 10^{-6})(8.0)(20.0) \\ &= 5.33 \times 10^{-4} \text{ N} \end{aligned}$$



9-7 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูป 9-13 ภาพถ่ายรังสีความร้อนเทอร์โมแกรม เป็นเทคนิคหนึ่งในการตรวจวัดความร้อนจากระยะไกล ภาพศรีษะแมวทางซ้าย ส่วนที่ร้อนสุด เป็นสีชมพู ส่วนที่เย็นเป็นสีน้ำเงิน ส่วนภาพถ่ายมหาสมุทรแอตแลนติกทางขวา ได้จากดาวเทียม สีแดง แสดงถึงกระแสน้ำอุ่น

ความเร็ว (v) ความถี่ (f) และความยาวคลื่น (λ) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความสัมพันธ์เหมือนกับคลื่นชนิดอื่น ๆ คือ

$$v = f\lambda \quad (9-19)$$

ความถี่ของคลื่นจะเป็นปฏิภาคผกผันกับความยาวคลื่น เราสามารถแบ่งประเภทของคลื่นแม่เหล็กโดยอาศัยความถี่เป็นหลัก เรียกว่าสเปกตรัม (spectrum) ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แบ่งเป็น

1. **คลื่นวิทยุโทรทัศน** เป็นคลื่นที่ใช้ส่ง-รับวิทยุและโทรทัศน มีความถี่ตั้งแต่ 2-3 Hz ไปจนถึง 10^9 Hz คลื่นวิทยุในช่วง AM (Amplitude Modulation) มีความถี่พาหะอยู่ระหว่าง 530 KHz ถึง 1600 KHz คลื่นวิทยุ FM (Frequency Modulation) มีความถี่ในช่วง 88 MHz ถึง 108 MHz คลื่นวิทยุ-โทรทัศนนี้ทำให้เกิดได้โดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดจากฟ้าผ่าจะมีความถี่ในย่านนี้เช่นกัน

2. **ไมโครเวฟ (Microwave)** มีความยาวคลื่นในช่วง 1 มิลลิเมตร ถึง 30 เซนติเมตร หรือความถี่ 10^9 Hz ถึง 3×10^{11} Hz สามารถผลิตคลื่นชนิดนี้ได้โดยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เราใช้คลื่นไมโครเวฟในการประกอบอาหารเพราะความถี่ในช่วงไมโครเวฟเป็นความถี่ธรรมชาติของโมเลกุลของน้ำ พลังงานที่โมเลกุลของน้ำได้รับจะกลายเป็นความร้อนทำให้อาหารสุก

ไมโครเวฟใช้ทำเรดาร์ (RADAR, Radio Detection and Ranging) ซึ่งใช้ในการตรวจจับเครื่องบินและการจราจร

3. **รังสีอินฟราเรด (Infrared Wave)** เรียกอีกอย่างหนึ่งว่าเป็นรังสีความร้อน มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 1 มิลลิเมตรถึง 7×10^{-7} เมตร หรือความถี่ตั้งแต่ 3×10^{11} Hz ถึง 4×10^{14} Hz วัตถุเมื่อได้รับรังสีนี้จะร้อนขึ้นเพราะพลังงานของคลื่นจะทำให้อะตอมสั่นมากขึ้น



รังสีอินฟราเรดสามารถผ่านหมอกควันได้ดีกว่าแสงที่ตามองเห็น จึงมีการพัฒนาฟิล์มที่ไวต่อแสงอินฟราเรด เมื่อถ่ายภาพภูมิประเทศจากเครื่องบินหรือดาวเทียมโดยใช้ฟิล์มชนิดนี้จะมองเห็นความแตกต่างและรายละเอียดของพื้นดินได้มากกว่าใช้ฟิล์มปกติ เช่น สามารถจำแนกทุ่งข้าวโพดและทุ่งข้าวสาลีได้ เพราะรัศมีพืชทั้งสองแผ่รังสีความร้อนที่มีความยาวคลื่นต่างกัน

กล้องโทรทัศน์บางชนิดสามารถรับรังสีอินฟราเรดและเปลี่ยนภาพที่เกิดจากรังสีอินฟราเรดนี้เป็นคลื่นแสงที่ตามนุษย์มองเห็นได้ รายละเอียดของภาพจะต่างไปจากภาพที่เห็นทั่วไป ตรงส่วนที่ไม่มีเสื้อผ้าปกคลุมจะสว่างมากกว่าปกติ ในทางการแพทย์การตรวจร่างกายด้วยรังสีอินฟราเรดจะเห็นตำแหน่งที่ให้อุณหภูมิความร้อนมากกว่าปกติ ตำแหน่งตรงนั้นอาจมีแนวโน้มที่เนื้อเยื่อเจริญแบบผิดปกติ

4. แสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 4,000 ถึง 7,000 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$) หรือความถี่อยู่ในช่วง $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ถึง $8 \times 10^{14} \text{ Hz}$ เพราะความถี่ที่แตกต่างกันทำให้ตามนุษย์มองเห็นเป็นสีต่าง ๆ กัน ปรสภตตของมนุษย์จะไวต่อแสงสีเหลืองแกมเขียว ซึ่งมีความยาวคลื่น $5.6 \times 10^{-7} \text{ m}$ มากที่สุด

ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงที่ตามองเห็นได้แยกเป็นตารางดังนี้

ตาราง 9-1 ความยาวคลื่นและความถี่ของแสงที่ตามองเห็นได้

สี	ความยาวคลื่น (10^{-7} m)	ความถี่ (10^{14} Hz)
ม่วง	3.90 - 4.55	7.69 - 6.59
น้ำเงิน	4.55 - 4.92	6.59 - 6.10
เขียว	4.92 - 5.77	6.10 - 5.20
เหลือง	5.77 - 5.97	5.20 - 5.03
ส้ม	5.97 - 6.22	5.03 - 4.82
แดง	6.22 - 7.80	4.82 - 3.84

บทความออนไลน์



กล้องมองในความมืด

(night vision)

กล้องพวกนี้แยกเทคโนโลยีออกเป็น 2 แบบ คือ

1. **Image enhancement**
2. **Thermal imaging** ฟิลิกรัสมงคล จะอธิบายหลักการพื้นฐานของเทคโนโลยีทั้งสองนี้ เพื่อจะนำไปสู่การประยุกต์ใช้อีกมากมาย ในหน้าถัดไป [คลิกครับ](#) 🌞

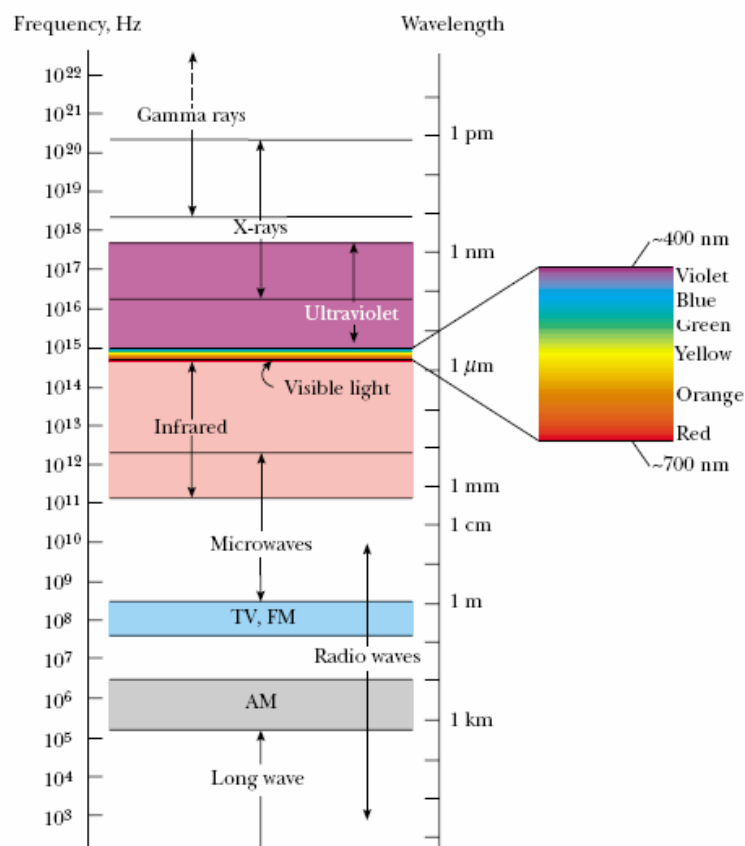


5. รังสีอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet light) มีความยาวคลื่นในช่วง 60 nm ถึง 380 nm หรือความถี่ในช่วง 8×10^4 Hz ถึง 3×10^{17} Hz รังสีนี้ส่วนใหญ่ได้มาจากดวงอาทิตย์ ถ้ามนุษย์ได้รับรังสีนี้เป็นจำนวนมากจะเป็นอันตรายได้ ถ้าได้รับเป็นจำนวนน้อย ๆ จะทำให้ผิวหนังเป็นสีน้ำตาล ชั้นบรรยากาศที่อยู่สูงจากพื้นโลกจะมีโอโซน (Ozone, O₃) ช่วยป้องกันรังสีนี้

รังสีอัลตราไวโอเล็ตใช้ฆ่าเชื้อโรค หลอดอัลตราไวโอเล็ตตามโรงพยาบาลใช้ในการอบฆ่าเชื้อเครื่องมือผ่าตัด และห้องผ่าตัด เราใช้หลอดไฟอัลตราไวโอเล็ตที่มีความเข้มต่ำส่องเหนือชั้นวางของชำและเนื้อสดเพื่อลดปริมาณการเน่าเสีย

6. รังสีเอ็กซ์ (X-rays) มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 10^{-4} nm ถึง 10 nm หรือมีความถี่ในช่วง 3×10^{17} Hz ถึง 5×10^{19} Hz รังสีเอ็กซ์ได้มาจากอิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานสูงเคลื่อนที่ผ่านอะตอมของธาตุโลหะหนัก อิเล็กตรอนจะถูกหน่วง การเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนพลังงานจะถูกปล่อยออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ ประโยชน์ของรังสีเอ็กซ์ใช้ในการวินิจฉัยโรคและตรวจสอบวัสดุทึบแสง เช่น ชิ้นส่วนของเครื่องจักรว่ามีรอยแตกร้าวภายในหรือไม่

7. รังสีแกมมา (Gamma rays) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^{-10} m จนถึง 10^{-14} m หรือมีความถี่ตั้งแต่ 3×10^{18} Hz ถึง 3×10^{22} Hz พบรังสีนี้จากการแผ่รังสีของสารกัมมันตรังสีและเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สามารถทะลุและทำลายเนื้อเยื่อสิ่งมีชีวิต เราสามารถใช้รังสีแกมมาในการรักษาโรคมะเร็งได้



รูป 9-14 แผนภาพแสดงสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



9-8 การสื่อสารด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

บทความออนไลน์



ด้วยการแตะขั้วของแบตเตอรี่ 9 โวลต์ด้วยเหรียญ คุณสามารถสร้างสัญญาณวิทยุ โดยที่เครื่องรับวิทยุ AM สามารถรับได้

แบตเตอรี่ กับเหรียญบาททำหน้าที่เป็นเครื่องส่งสัญญาณวิทยุได้ แต่ให้เสียงสัญญาณเป็นเสียงแตรกๆเท่านั้น และการส่งทำได้ไม่ไกลนัก แต่ถ้าคุณเรียนรู้การส่งรหัสมอร์ส โดยการส่งเป็นสัญญาณสั้นและยาวสลับกันไป คุณก็ใช้วิธีนี้ส่งสัญญาณได้ [อ่านต่อครับ](#) 🌞

หลักสำคัญในการสื่อสารโดยใช้แสง ก็คือ จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของแสงจากน้อยไปหามาก หรือมากไปหาน้อย เพื่อจะใช้ในการส่งรหัสหรือสัญญาณซึ่งเป็นที่เข้าใจกันระหว่างผู้ส่งและผู้รับ ในยุคปัจจุบัน ขาวสารที่ส่งนั้นสามารถจะส่งเป็นคำพูด เสียงดนตรี และภาพที่เคลื่อนไหวได้ โดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในระยะแรกที่มีการค้นพบและนำเอาคลื่นวิทยุมาส่งได้รหัสมอร์ส (Morse code) คือ ยาวและสั้น แล้วประกอบกันขึ้นเป็นอักษรทีละตัว ต่อมาก็สามารถส่งเสียง จนกระทั่งส่งภาพโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงของคลื่นพาหะ (carrier wave) เพราะเราไม่สามารถจะใช้คลื่นเสียงในการติดต่อทางไกลได้ แต่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ที่เหมาะสมจะเดินทางได้ไกล วิธีการที่จะใส่สัญญาณลงไปบนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ เราเรียกว่า โมดูเลชัน (modulation) เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปถึงปลายทางแล้วก็มึวิธีการที่แยกเอาสัญญาณที่ต้องการออก และขบวนการนั้นเรียกว่า ดีโมดูเลชัน (demodulation)

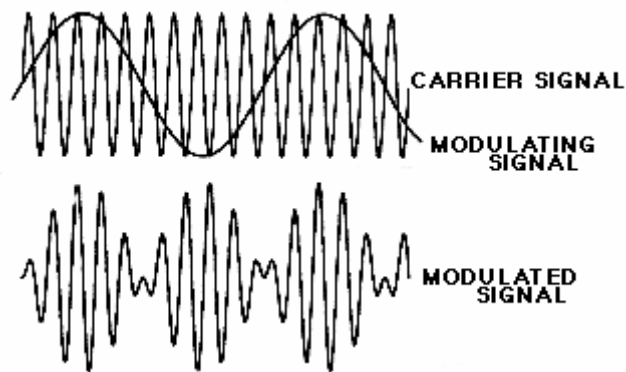
ในขั้นแรก เราจะพิจารณาการส่งวิทยุโทรเลขเสียก่อน การส่งวิทยุโทรเลขเป็นการส่งสัญญาณใช้รหัสมอร์ส (Morse code) เครื่องส่งจะประกอบด้วยเครื่องกำเนิดไฟฟ้าความถี่สูง มีความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นวิทยุที่จะใช้เป็นคลื่นพาหะ ถ้าไฟฟ้าความถี่สูงมีกำลังมากพอก็จะถูกส่งออกไปตามสายอากาศ และเคลื่อนที่ไปตามที่วางถึงผู้ที่จะรับ ผู้รับต้องใช้สายอากาศสำหรับรับคลื่นวิทยุ แยกเอาเฉพาะคลื่นที่ต้องการด้วยวงจรเรโซแนนซ์ ส่วนมากสัญญาณเมื่อมาถึงผู้รับจะมีกำลังอ่อนมาก จะต้องอาศัยเครื่องขยายและแยกเอารหัสที่ต้องการออกด้วยเครื่องตรวจหา (detector) เพราะเพียงคลื่นวิทยุอย่างเดียวหูฟังจะไม่สามารถได้ยินรหัสได้ เนื่องจากความถี่ของคลื่นพาหะสูงเกินไปที่จะรับฟังได้ด้วยหู ถ้าไม่ใช้หูฟัง รหัสอาจ



ถูกบันทึกไว้ด้วยเครื่องรับโทรเลข หรือในสมัยใหม่ใช้เครื่องโทรพิมพ์ (teletype) พิมพ์ออกมาเป็นข้อความและอ่านได้เลย

การส่งกระจายเสียงออกเป็นคำพูดและเสียงดนตรีนั้น การใส่คลื่นเสียงลงไปในการส่งคลื่นพาที่เรียกว่า โมดูเลชันนั้น มีวิธีที่นิยมอยู่ 2 วิธี คือ โมดูเลชันด้วยแอมพลิจูด (amplitude modulation) ที่เรียกย่อๆ เอ เอ็ม (AM) และโมดูเลชันด้วยความถี่ (frequency modulation) ซึ่งเรียกย่อๆ ว่า เอฟ เอ็ม (FM) ความแตกต่างระหว่างเอเอ็ม และเอฟเอ็ม เป็นดังนี้

โมดูเลชันด้วยแอมพลิจูดอาศัยการเปลี่ยนแปลงของแอมพลิจูดของคลื่นพาซึ่งสอดคล้องกับความถี่ของคลื่นเสียงที่เป็นสัญญาณ ดังรูป 9-15



รูป 9-15 แสดงโมดูเลชันด้วยแอมพลิจูด

การโมดูเลตด้วยความถี่นั้นอาศัยการเปลี่ยนแปลงของความถี่ของคลื่นพาหะเล็กน้อย ความถี่ที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณ ส่วนแอมพลิจูดของคลื่นพาและคลื่นที่ถูกโมดูเลตแล้วไม่เปลี่ยนมีค่าคงที่ ความถี่หรือความยาวคลื่นเปลี่ยนไปจากคลื่นที่ยังไม่ถูกโมดูเลตโดยที่แอมพลิจูดมีค่าคงที่เสมอ ทำให้พลังงานที่ออกอากาศมีค่าเสมอต้นเสมอปลายได้ดีกว่าระบบเอ เอ็ม

การส่งภาพโดยอาศัยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะเป็นภาพนิ่งหรือโทรทัศน์ก็ตามมีความยุ่งยากเพิ่มขึ้นทั้งการส่งภาพนิ่งและโทรทัศน์จะต้องแบ่งภาพออกเป็นเส้นเรียงจากบนลงมาข้างล่างแล้ววัดความเข้ม และสัญญาณจะต้องบอกความเข้ม ณ จุดหนึ่งจุดใดของภาพ ที่เรียกว่า การกวาด (scanning) การส่งภาพนิ่งทำได้ง่ายกว่าการส่งโทรทัศน์ เพราะแต่ละครั้งจะมีอยู่ภาพเดียว การที่จะกำหนดว่าตำแหน่งของความเข้มที่ส่งนั้นทำได้โดยอาศัยสัญญาณกำหนดเวลา เช่น จากจุดตั้งต้นของเส้นแรกและจุดตั้งต้นของเส้นต่อไป ก็จะต้องมีสัญญาณกำหนดเวลาบอกไว้ทุกครั้งไป

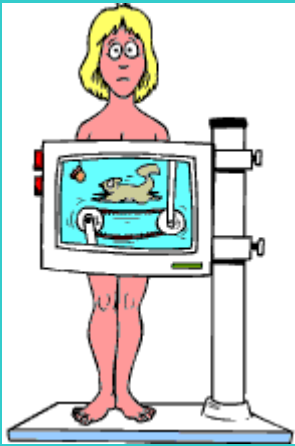
ส่วนการส่งภาพที่เคลื่อนไหวได้นั้น อาศัยหลักการส่งภาพนิ่งหลายๆ ภาพ ในช่วงเวลาที่สั้น กว่าขีดจำกัดของสายตาในการแยกภาพ ทำให้ผู้รับมีความรู้สึกเหมือนเห็นวัตถุเคลื่อนไหวได้ เช่น ภาพยนตร์ การส่งวิทยุโทรทัศน์นั้นแบ่งได้เป็น 2 ภาค คือ ภาคเสียง และภาคภาพ ใช้ความถี่ต่างกันแต่ไม่ห่างกันมากนัก ภาคเสียงใช้ระบบเอ เอฟ เอ็ม และภาคภาพใช้ระบบเอ เอ็ม

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญมากสำหรับการติดต่อสื่อสารและความถี่ที่ใช้ก็มีได้หลายช่วง เช่น ตั้งแต่ความถี่ต่ำมากสำหรับใช้ในการติดต่อระหว่างเรือดำน้ำและฐานปฏิบัติการ คลื่นไมโครเวฟ ใช้สำหรับการติดต่อเป็นเส้นตรงระหว่างจุดส่งถึงจุดรับ เช่น จากพื้นดินถึงดาวเทียม นอกจากนี้การโมดูเลตคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังมีอีกวิธีหนึ่งเรียกว่า โมดูเลชันด้วยคลื่นดล (pulse modulation) คือตัดช่วงคลื่นให้เป็นช่วงสั้นๆ ที่เรียกว่า คลื่นดล (pulse) ซึ่งจะหาความรู้เพิ่มเติม ได้จากตำราวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์



นอกจากจะใช้ในการสื่อสารแล้ว คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่บางขนาด เช่น ไมโครเวฟ ยังเป็นประโยชน์สามารถใช้แทนหน้าต่างที่คลื่นแสงไม่สามารถเดินทางผ่านได้ เช่น ในกรณีหมอกลงจัด ระบบเรดาร์ซึ่งอาศัยหลักการสะท้อนของไมโครเวฟจากวัตถุทั้งที่อยู่กับที่และเคลื่อนที่ ทำให้สามารถเห็นภูมิประเทศสะดวกในการขึ้นลงของเครื่องบิน และหาเครื่องบินและเรือรบในยามสงคราม เป็นการเตือนภัยล่วงหน้าได้อย่างดี การตรวจตำแหน่งของเครื่องบินพาณิชย์ของหอบังคับการบิน

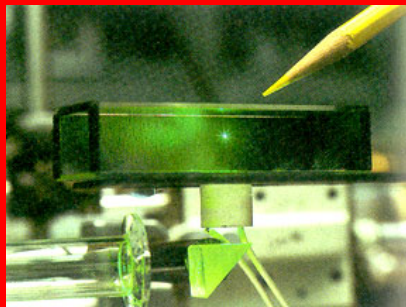
วิดีโอการศึกษา



เอกซเรย์ส่องทะลุเสื้อผ้า

ผลงานอันแสนมหัศจรรย์ของนักวิทยาศาสตร์ ที่ทำให้เราสามารถดูเอกสารได้โดยไม่ต้องเปิด สิ่งประดิษฐ์นี้ยังสามารถส่องทะลุเสื้อผ้าหรือวัตถุทึบแสงต่างๆ โดยการเลือกความถี่ที่เหมาะสม เสื้อผ้าจะดูใสแจ๋ว เห็นเนื้อหนังมังสาภายในได้โดยเครื่องต้นแบบถูกสร้างขึ้นแล้ว การใช้งานประสบความสำเร็จอย่างดียิ่ง เราสามารถใช้เครื่องนี้ส่องหามะเร็งผิวหนังได้ มันยังสามารถส่องผ่านทะลุน้ำ และม่านหมอก หน้าที่หนึ่งของมันคืองานรักษาความปลอดภัย เพื่อสอดส่องยาเสพติดสำหรับคนผ่านเข้าออกในสนามบิน แม้จะซ่อนเก็บไว้ใต้ร่มผ้าเครื่องนี้ก็สามารถตรวจพบได้ [คลิกครับ windows media 2.8 MB](#) 🌟

กระดานฟิสิกส์ราชมงคล



ภาพการทดลองยกเม็ดแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1ต่อพันของนิ้ว ด้วยแสงเลเซอร์ คุณสมารถอธิบายได้หรือไม่ว่า แสงทำไมถึงสามารถยกมวลได้ และไปเกี่ยวข้องกับเรือใบสุริยะได้อย่างไร ลงใน [กระดานฟิสิกส์ราชมงคลใหม่](#) 🌟



ทดสอบก่อนและหลังเรียน

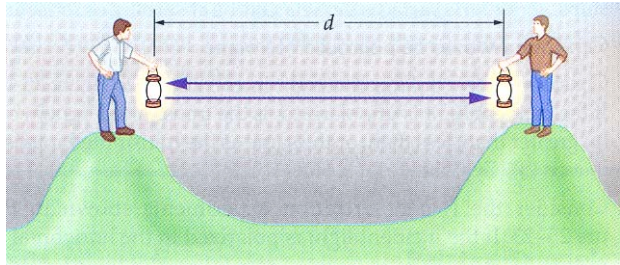
วิธีทำให้ใส่ชื่อ สกุล เลือกวิชาที่สอบ และจำนวนข้อ แต่ต้องไม่เกินจากที่กำหนดไว้ เช่น กำหนดไว้ 10 ข้อ เวลาเลือกจำนวนข้อ ให้เลือก 5 และ 10 ข้อไม่เกินจากนี้ เป็นต้นเมื่อทำเสร็จสามารถดูคะแนนจากรายละเอียดผู้ทำข้อสอบได้ที่

เรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

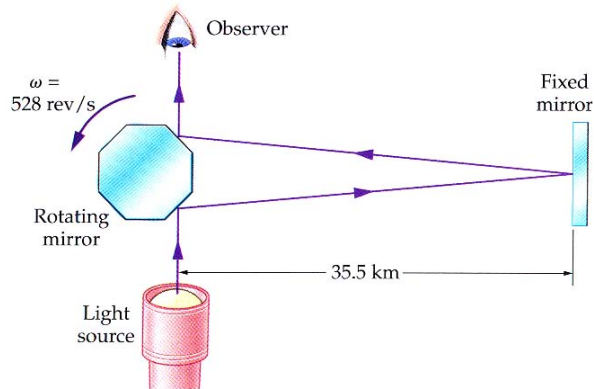
คลิกเข้าสู่ [การทดสอบก่อนและหลังเรียนคะ](#)

แบบฝึกหัดเรื่องคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

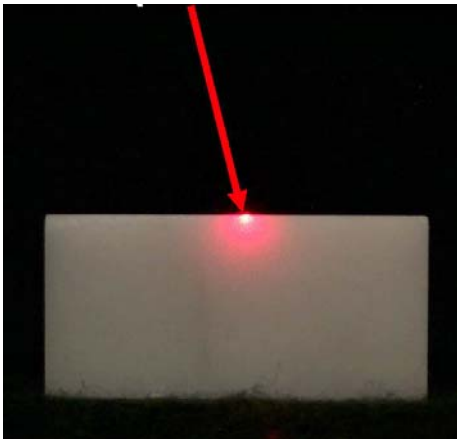
1. จงเขียนสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equation) ในรูปของอินทิกรัล พร้อมอธิบายอย่างสั้นๆ ถึงความสำคัญในแต่ละส่วน
2. กาลิเลโอพยายามวัดความเร็วของแสงโดยตัวเขาถือตะเกียงไว้ดวงหนึ่ง และผู้ช่วยถือตะเกียงไว้อีกดวงหนึ่ง ดังรูป จงคำนวณหาระยะ d ถ้าระยะเวลาที่แสงวิ่งไปกลับใช้เวลา 0.2 วินาที
[ตอบ 3×10^7 m]



3. ไมเคิลสันใช้เครื่องมือดังรูปในการวัดความเร็วแสง ให้กระจกแปดเหลี่ยมหมุนด้วยความเร็วรอบ 528 รอบต่อวินาที และระยะจากกระจกหมุนถึงกระจกสะท้อนคือ 35.5 km ถ้าแสงเดินทางเป็นระยะทาง 71.0 km กระจกหมุนไปได้ 1/8 รอบ จงคำนวณหาความเร็วแสง [ตอบ 3×10^8 m]

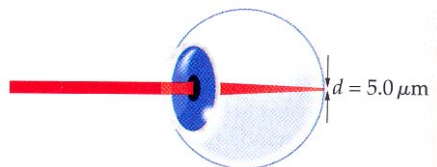


4. อัมพลิจูดของสนามแม่เหล็กในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ 5.4×10^{-7} T จงคำนวณอัมพลิจูดของสนามไฟฟ้า
- ก) เมื่อเคลื่อนที่ในที่ว่าง [ตอบ 162 N/C]
- ข) เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ในตัวกลางที่มีความเร็ว $0.8 c$ [ตอบ 130 N/C]
5. ในระบบ SI สนามไฟฟ้าในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คือ $E_y = 100 \sin(1.00 \times 10^7 x - \omega t)$ จงหา
- ก) อัมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก [ตอบ 333 nT]
- ข) ความยาวคลื่น [ตอบ 628 nm]
- ค) ความถี่ [ตอบ 4.77×10^4 Hz]
6. ค่าเฉลี่ยของพอยน์ติงเวกเตอร์ที่ระยะห่าง 5.0 ไมล์ จากสถานีส่งวิทยุที่มีกำลัง 250 kW [ตอบ $307 \mu \text{W/m}^2$]
7. อัมพลิจูดของสนามไฟฟ้า 0.2 V/m ที่ระยะ 20 km วัดจากสถานีส่งวิทยุ กำลังทั้งหมดที่เครื่องส่งมีเท่าไร [ตอบ 66.7 kW]



8. เลเซอร์ฮีเลียม - นีออน 15 mW ($\lambda = 632.8$ nm) เปล่งลำแสงที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 2.0 mm
- ก) จงหาค่าสนามไฟฟ้าสูงสุด [ตอบ 1.90 kv/m]
- ข) พลังงานทั้งหมดที่ระยะ 1.0 m เป็นเท่าไร [ตอบ 50 pJ]
- ค) จงหาโมเมนตัมที่ปรากฏ [ตอบ 1.67×10^{-19} kg.m/s]

9. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบระนาบมีฟลักซ์พลังงาน 750 W/m^2 พื้นผิวสี่เหลี่ยมขนาด $50 \text{ cm} \times 100 \text{ m}$ วางตั้งฉากกับคลื่นถ้าผิวนี้ดูดกลืนพลังงานครึ่งหนึ่งและสะท้อนพลังงานครึ่งหนึ่งจงคำนวณหา
- ก) พลังงานที่ถูกดูดกลืนโดยผิวในเวลา 1 นาที [ตอบ 11.3 kJ]
- ข) โมเมนตัมที่ถูกดูดกลืนไว้เมื่อเวลานี้ [ตอบ 5.65×10^{-5} kg.m/s]
10. เลเซอร์กำลัง 0.75 mW ส่องผ่านเข้าไปในลูกตาดังรูป จงคำนวณหา
- ก) พลังงานที่ตาดูดกลืนในเวลา 0.2 วินาที [ตอบ 0.2 mJ]
- ข) ถ้าแสงเลเซอร์โฟกัสไปที่เรตินามีเส้นผ่าศูนย์กลาง $5.0 \mu \text{m}$ ความเข้มของแสงมีค่าเป็นกี่ W/cm^2 [ตอบ 3.8 kW/cm^2]



11.



นักวิทยาศาสตร์หลายคนเชื่อว่า มีสิ่งมีชีวิตนอกโลก วิธีหนึ่งที่จะค้นหาได้ คือ จับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มาจากอวกาศ ในรูปเป็นจานรับสัญญาณขนาดใหญ่ มีเส้นผ่าศูนย์กลางกว่า 300 เมตร เหตุผลที่ต้องใช้จานขนาดใหญ่มาก ๆ เพราะอะไร ?

12. สถานีวิทยุแห่งหนึ่งได้ส่งกระจายเสียงด้วยคลื่นความถี่ 900 kHz ดังนั้นความยาวคลื่นที่ส่งมีค่าเท่าใด ความถี่ของคลื่นที่ผ่านแต่ละจุดจะมีค่าเท่าใด ถ้าจุดรับห่างจากสถานี 50 กิโลเมตร
[ตอบ 333 m, $9 \cdot 00 \times 10^5$ Hz]
13. สถานีวิทยุกระจายเสียงแห่งประเทศไทยส่งคลื่นวิทยุระบบ เอ.เอ็ม ด้วยขนาดความถี่ 1,000 กิโลเฮิร์ตซ์ วิทยุเครื่องหนึ่งใช้ขดลวดเหนี่ยวนำขนาด 1 มิลลิเฮนรี่ จะต้องปรับตัวเก็บประจุให้มีความจุเท่าไรจึงจะรับสัญญาณได้ดี
[ตอบ 25.3 พิโคฟารัด]
14. เหตุใดการส่งคลื่นวิทยุระบบเอเอ็มจึงคลุมพื้นที่ได้ไกลกว่าการส่งคลื่นวิทยุระบบเอฟ เอ็ม หรือการส่งคลื่นโทรทัศน์
15. อธิบายการโมดูชัน และการดีโมดูเลชัน



หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเตอร์เน็ต
ทดสอบออนไลน์	วิดีโอการเรียนการสอน
หน้าแรกในอดีต	แผ่นใสการเรียนการสอน
เอกสารการสอน PDF	กิจกรรมการทดลองทางวิทยาศาสตร์
แบบฝึกหัดออนไลน์	สุดยอดสิ่งประดิษฐ์
การทดลองเสมือน	
บทความพิเศษ	ตารางธาตุ)ไทย1) 2 (Eng)
พจนานุกรมฟิสิกส์	ลับสมองกับปัญหาฟิสิกส์
ธรรมชาติมหัศจรรย์	สูตรพื้นฐานฟิสิกส์
การทดลองมหัศจรรย์	ดาราศาสตร์ราชมงคล
แบบฝึกหัดกลาง	
แบบฝึกหัดโลหะวิทยา	แบบทดสอบ
ความรู้รอบตัวทั่วไป	อะไรเอ่ย ?
ทดสอบ)เกมเศรษฐี(คติปริศนา
ข้อสอบเอนทรานซ์	เฉลยกลศาสตร์เวกเตอร์
คำศัพท์ประจำสัปดาห์	
ความรู้รอบตัว	
การประดิษฐ์ของโลก	ผู้ได้รับโนเบลสาขาฟิสิกส์
นักวิทยาศาสตร์เทศ	นักวิทยาศาสตร์ไทย
ดาราศาสตร์พิศวง	การทำงานของอุปกรณ์ทางฟิสิกส์
การทำงานของอุปกรณ์ต่าง ๆ	

 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 1 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. การวัด	2. เวกเตอร์
3. การเคลื่อนที่แบบหนึ่งมิติ	4. การเคลื่อนที่บนระนาบ
5. กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน	6. การประยุกต์กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน
7. งานและพลังงาน	8. การดลและโมเมนตัม
9. การหมุน	10. สมดุลของวัตถุแข็งเกร็ง
11. การเคลื่อนที่แบบคาบ	12. ความยืดหยุ่น
13. กลศาสตร์ของไหล	14. ปริมาณความร้อน และ กลไกการถ่ายโอนความร้อน
15. กฎข้อที่หนึ่งและสองของเทอร์โมไดนามิก	16. คุณสมบัติเชิงโมเลกุลของสสาร
17. คลื่น	18. การสั่น และคลื่นเสียง
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ 2 ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. ไฟฟ้าสถิต	2. สนามไฟฟ้า
3. ความกว้างของสายฟ้า	4. ตัวเก็บประจุและการต่อตัวต้านทาน
5. ศักย์ไฟฟ้า	6. กระแสไฟฟ้า
7. สนามแม่เหล็ก	8. การเหนี่ยวนำ
9. ไฟฟ้ากระแสสลับ	10. ทรานซิสเตอร์
11. สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและเสาอากาศ	12. แสงและการมองเห็น
13. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ	14. กลศาสตร์ควอนตัม
15. โครงสร้างของอะตอม	16. นิวเคลียร์
 การเรียนรู้การสอนฟิสิกส์ทั่วไป ผ่านทางอินเทอร์เน็ต 	
1. จลศาสตร์ (kinematic)	2. จลพลศาสตร์ (kinetics)
3. งานและโมเมนตัม	4. ซิมเปิลฮาร์โมนิก คลื่น และเสียง
5. ของไหลกับความร้อน	6. ไฟฟ้าสถิตกับกระแสไฟฟ้า
7. แม่เหล็กไฟฟ้า	8. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับแสง
9. ทฤษฎีสัมพัทธภาพ อะตอม และนิวเคลียร์	

