

จากบทเรียนที่ผ่านมาทราบว่า ไฟฟ้าและแม่เหล็กมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกัน ในบทนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการทำนายทางคณิตศาสตร์โดยแมกซ์เวลล์ และการทดลองของเฮิร์ตซ์ ที่แสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเป็นองค์ประกอบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)

13.1 สมการแมกซ์เวลล์

แมกซ์เวลล์ได้ประมวลความรู้ที่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์พื้นฐานทั้งหมดทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น 4 สมการ ในกรณีปราศจากสารไดอิเล็กตริกและสารแม่เหล็ก สมการทั้งสี่อยู่ในรูปต่อไปนี้

- สมการที่ 1 คือ กฎของเกาส์ กล่าวว่า “ฟลักซ์ไฟฟ้าสุทธิที่ผ่านผิวปิดมีค่าเท่ากับประจุไฟฟ้าสุทธิภายในผิวปิดนั้นหารด้วยค่า ϵ_0 ”

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (13-1)$$

- สมการที่ 2 คือ กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก กล่าวว่า “ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิที่ผ่านผิวปิดใด ๆ มีค่าเป็นศูนย์ เสมอ” นั่นคือไม่มีขั้วแม่เหล็กเดียว

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (13-2)$$

- สมการที่ 3 คือ กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ กล่าวว่า “ผลอินทิเกรตเชิงเส้นของสนามไฟฟ้ารอบเส้นทางปิดใด ๆ มีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านเส้นทางปิดนั้น” นั่นคือ การเปลี่ยนแปลงฟลักซ์แม่เหล็กก่อให้เกิดสนามไฟฟ้า

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (13-3)$$

- สมการที่ 4 คือ กฎแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ กล่าวว่า “ผลอินทิเกรตเชิงเส้นของสนามแม่เหล็กรอบเส้นทางปิดใด ๆ มีค่าเท่ากับผลบวกของกระแสรวมภายในเส้นทางนั้นคูณด้วย μ_0 กับการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์ไฟฟ้าผ่านเส้นทางปิดนั้นคูณด้วย $\epsilon_0\mu_0$ ” นั่นคือ กระแสไฟฟ้าหรือการเปลี่ยนแปลงสนามไฟฟ้าก่อให้เกิดสนามแม่เหล็ก

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0\mu_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (13-4)$$

13.2 สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการข้างต้นทั้งสี่ แมกซ์เวลล์ทำการแทนค่า และรวมสมการเข้าด้วยกัน ผลที่ได้คือสมการที่แสดงให้เห็นว่า สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงอยู่ในรูปคลื่น และจากสมการคลื่น แมกซ์เวลล์ก็สามารถทำนายการมีอยู่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก่อนที่จะมีใครค้นพบ

สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (13-5)$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0\epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (13-6)$$

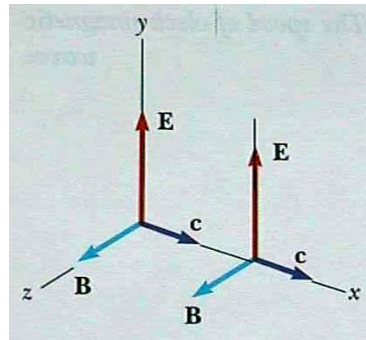
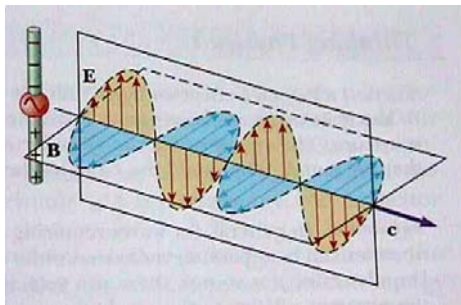
คำตอบของสมการคือ

$$E = E_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (13-7)$$

$$B = B_{\max} \cos(kx - \omega t) \quad (13-8)$$

โดยที่ k คือเลขคลื่น (Wave Number) λ คือความยาวคลื่นและ ω คืออัตราเร็วเชิงมุม

นั่นคือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเปลี่ยนแปลงแบบรูปคลื่นไซน์ การเปลี่ยนแปลง (หรือการสั่น) ของสนามไฟฟ้า จะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามเหล็กด้วย ในทางกลับกันการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กก็จะเหนี่ยวนำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าด้วย และจะเหนี่ยวนำในลักษณะตั้งฉากกันต่อเนื่องเป็นคลื่นที่เรียกว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นคลื่นตามขวาง (Transverse Wave) เนื่องจากทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น ตั้งฉากกับทิศการสั่นของสนามแม่เหล็ก และสนามไฟฟ้า



ภาพที่ 13-1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าสั่นในระนาบที่ตั้งฉากกัน

13.3 ความเร็วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการคลื่นกล

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (13-9)$$

โดยที่ c คืออัตราเร็วของคลื่น เมื่อเทียบกับสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า c มีค่าเป็น

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (13-10)$$

คำนวณค่า c โดยการแทนค่า Permittivity และ Permeability

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A} \quad (13-11)$$

$$\epsilon_0 = 8.85418 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2 \quad (13-12)$$

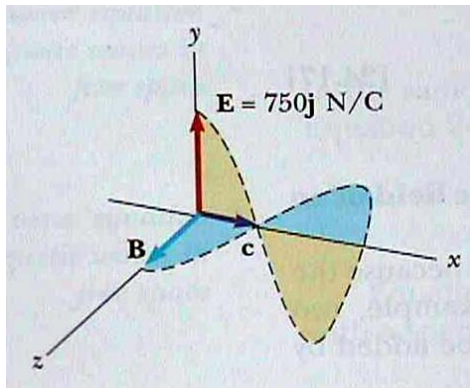
$$c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (13-13)$$

ค่าคงที่มีค่าเท่ากับอัตราเร็วของแสงในสุญญากาศพอดี นำไปสู่อธิบายว่าแสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ความสัมพันธ์อีกข้อหนึ่ง คือ

$$\frac{E}{B} = c \quad (13-14)$$

ทำให้สามารถคำนวณสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กเมื่อทราบค่าของอีกปริมาณหนึ่ง

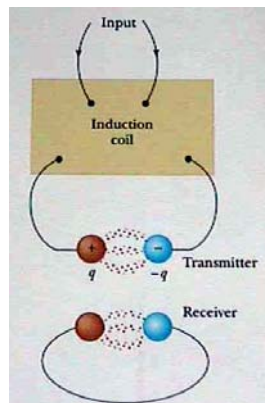
คำถาม 1: คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ารูปไซน์มีความถี่ 40 MHz เคลื่อนที่ในสุญญากาศในทิศทาง x ดังภาพ ในขณะที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงสุดเป็น 750 N/C ตามแกน y จงคำนวณหาความยาวคลื่น, คาบของคลื่น และสนามแม่เหล็กสูงสุด



ภาพที่ 13-2 ภาพประกอบคำถามที่ 1

13.4 การทดลองของเฮิร์ตซ์

ในปี ค.ศ. 1888 เฮิร์ตซ์เป็นคนแรกที่ส่งและรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในห้องทดลอง เป็นการยืนยันทฤษฎีของแมกซ์เวลล์ ในการทดลอง เฮิร์ตซ์ใช้วงจร LC เป็นเครื่องส่ง กำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยการเร่งอิเล็กตรอนให้สั่นระหว่างตัวเหนี่ยวนำกับตัวเก็บประจุ เมื่ออนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ด้วยความเร่งจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ซึ่งสามารถรับได้ด้วยเครื่องรับที่มีหลักการทำงานกลับกันกับเครื่องส่ง



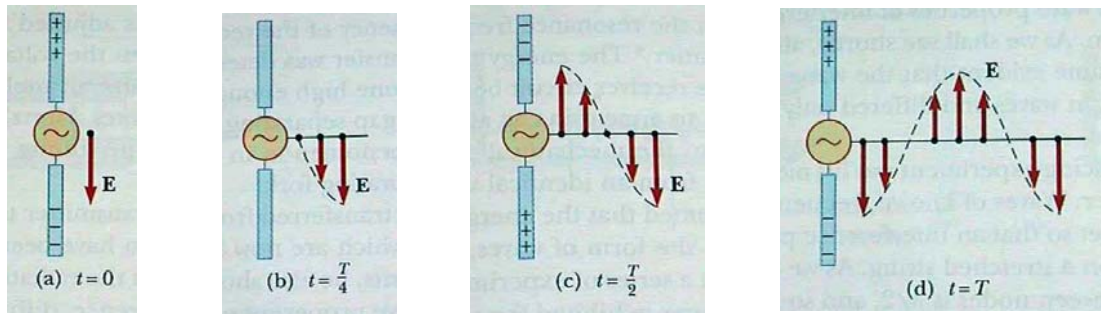
ภาพที่ 13-3 การทดลองของเฮิร์ตซ์

13.5 สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถแบ่งได้เป็น 7 ชนิด ตามความถี่ เรียงจากน้อยไปมากคือ คลื่นวิทยุ ไมโครเวฟ อินฟราเรด แสงที่ตามองเห็น อัลตราไวโอเล็ต รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา แม้จะมีความถี่ต่างกัน แต่ทุกชนิดเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากัน

13.6 การสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของเสาอากาศ

ในปัจจุบัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้กันอย่างกว้างขวางในการสื่อสารทั้งคลื่นวิทยุ และ ไมโครเวฟ หลักการพื้นฐานในการส่งคลื่น คือ การใช้วงจรเครื่องส่งเร่งประจุ ให้เคลื่อนที่ขึ้นลงในส่วนที่เรียกว่า เสาอากาศ ด้วยกระบวนการใน 1 รอบ ดังแสดงในภาพที่ 13-4



ภาพที่ 13-4 การกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเสาอากาศ

13.7 พลังงานและโมเมนตัมในการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เมื่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่ออกไปจะนำเอาพลังงานไปด้วย ตัวอย่างเช่น การที่ดวงอาทิตย์ถ่ายเทพลังงานมายังโลกได้เพราะดวงอาทิตย์ส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา แมกซ์เวลล์เสนอว่าพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นอยู่กับ ความเข้ม (Intensity) ของคลื่น ความเข้มสามารถกำหนดโดยอาศัย Poynting Vector ซึ่งนิยามโดย

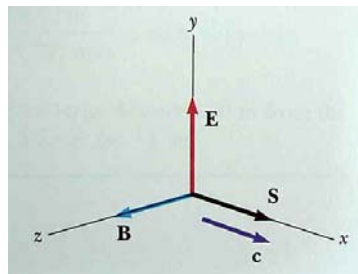
$$\bar{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \bar{E} \times \bar{B} \quad (13-15)$$

เนื่องจากเวกเตอร์ E และ B ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตั้งฉากกันดังนั้น

$$S = \frac{1}{\mu_0} |\bar{E} \times \bar{B}| \quad (13-16)$$

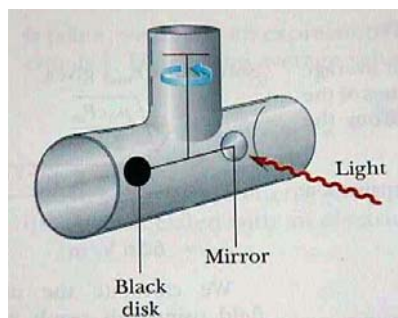
$$= \frac{1}{\mu_0} EB = \frac{1}{\mu_0} E \frac{E}{c} = \frac{1}{\mu_0} \frac{E^2}{c} \quad (13-17)$$

$$S = \frac{cB^2}{\mu_0} \quad (13-18)$$



ภาพที่ 13-5 ทิศของ Poynting Vector

นอกจากนี้แมกซ์เวลล์แสดงว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ส่งผ่านโมเมนตัมไปพร้อมกับพลังงาน สามารถพิสูจน์ได้ด้วยอุปกรณ์ดังภาพที่ 13-6 ซึ่งแสงถ่ายเทโมเมนตัมให้กับแผ่นกระจกในสุญญากาศ ทำให้แกนของอุปกรณ์บิดไปจากแนวเดิมได้



ภาพที่ 13-6 ชุดทดสอบโมเมนตัมของแสง

ในกรณีที่มีการดูดกลืนคลื่นหมด โมเมนตัมจะมีค่า $p = U/c$ ความดันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่า $P = 2S/c$ จากการคำนวณ ความดันของแสงอาทิตย์มีค่า $5 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$ ซึ่งเป็นค่าที่น้อยมาก

สำหรับความเข้มของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า คำนวณได้จาก

$$I = \bar{S} = \frac{1}{\mu_0} \int_0^t E_{\max} B_{\max} \cos^2(\omega t) dt$$

$$= \frac{1}{\mu_0} E_{\max} B_{\max} \int_0^t \cos^2(\omega t) dt = \frac{1}{\mu_0} E_{\max} B_{\max} \frac{1}{2} \quad (13-19)$$

$$= \frac{1}{2\mu_0} E_{\max} B_{\max} = \frac{E_{\max}^2}{2c\mu_0}$$

$$I = \frac{cB_{\max}^2}{2\mu_0} \quad (13-20)$$

นั่นคือ ความเข้มของแสงแปรผันตรงกับสนามไฟฟ้ายกกำลังสอง หรือสนามแม่เหล็กยกกำลังสอง

คำถาม 2 : จานดาวเทียมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เมตร ได้รับสัญญาณวิทยุจากแหล่งกำเนิดที่อยู่ไกลมาก สัญญาณที่รับได้มี $E_{\max} = 0.200$ ไมโครโวลต์ต่อเมตร จงคำนวณ

- แอมพลิจูดของสนามแม่เหล็ก
- ความเข้มของรังสีที่ได้รับ
- แรงที่ จานดาวเทียมได้รับจากรังสี

หนังสืออิเล็กทรอนิกส์	
ฟิสิกส์ 1(ภาคกลศาสตร์(ฟิสิกส์ 1 (ความร้อน)
ฟิสิกส์ 2	กลศาสตร์เวกเตอร์
โลหะวิทยาฟิสิกส์	เอกสารคำสอนฟิสิกส์ 1
ฟิสิกส์ 2 (บรรยาย(แก้ปัญหาฟิสิกส์ด้วยภาษา C
ฟิสิกส์พิศวง	สอนฟิสิกส์ผ่านทางอินเทอร์เน็ต
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(คดีปริศนา
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	

