

# บทที่ 9

## คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

General Physics II

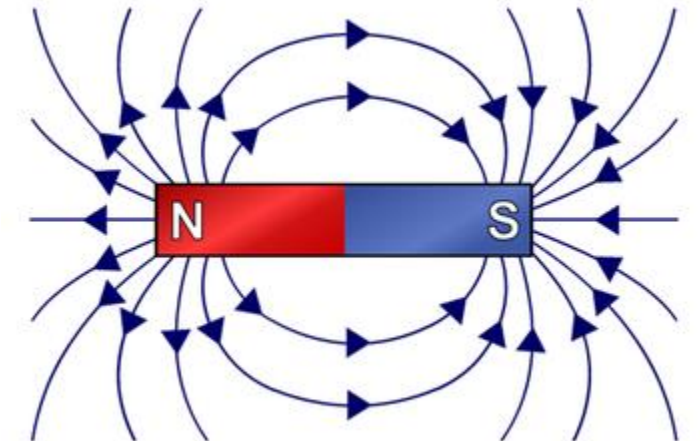
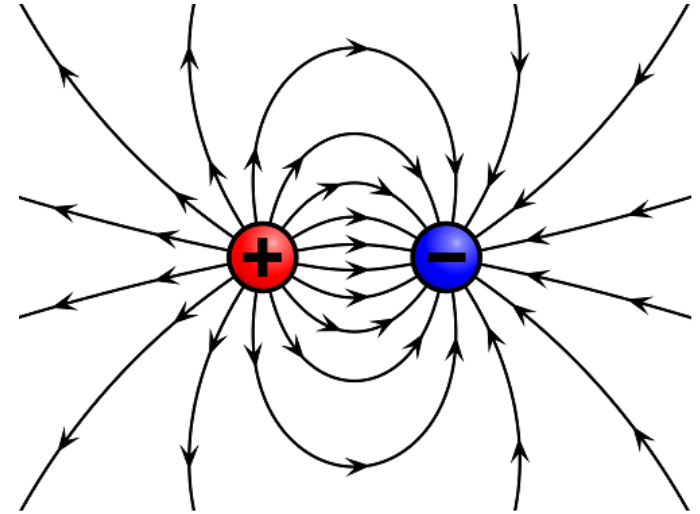
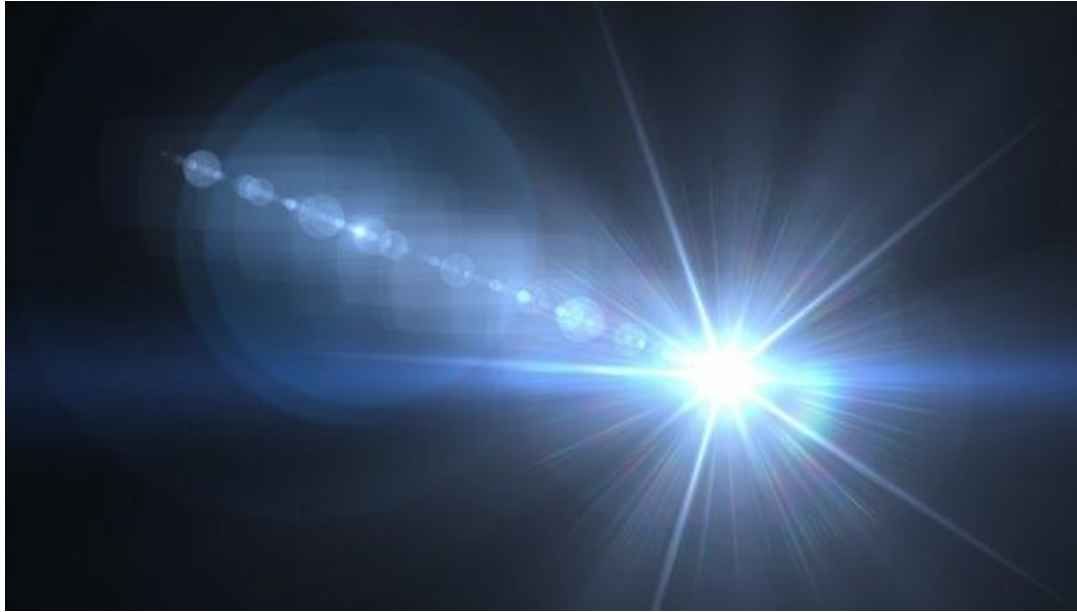
01420112

รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิศร์ ตั้งเจริญ

# คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)

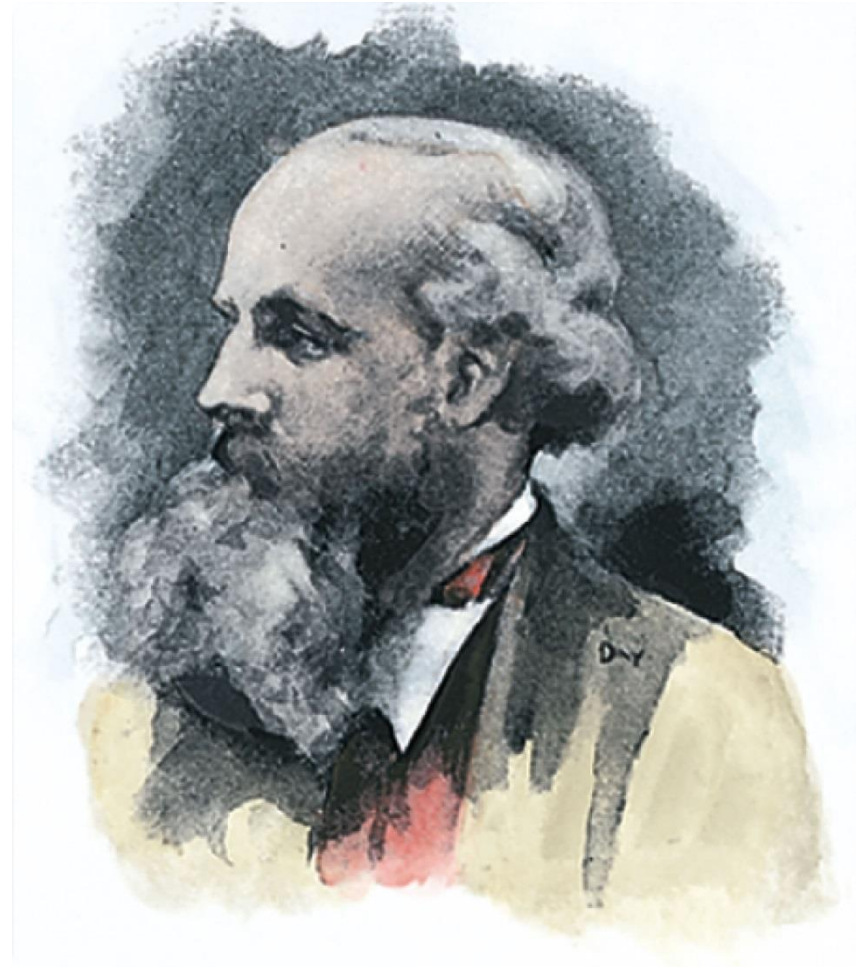
- คลื่นกล (Mechanical waves) ต้องการตัวกลาง (medium) ในการเคลื่อนที่เสมอ
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) สามารถเดินทางผ่านสุญญากาศได้
- สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) เป็นสิ่งเดียวที่สามารถอธิบายพื้นฐานทางทฤษฎีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทุกชนิดซึ่งเดินทางผ่านสุญญากาศด้วยความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง
- เฮิร์ต (Hertz) ยืนยันการทำนายของแมกซ์เวลล์ได้เป็นผลสำเร็จเมื่อเขาสามารถสร้างและตรวจพบการมีอยู่จริงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ในปี ค.ศ. 1887
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สร้างขึ้นจากการสั่น (oscillating) ของประจุไฟฟ้า (electric charges)
  - คลื่นที่แผ่ออกมาจากประจุที่กำลังสั่นสามารถถูกตรวจพบได้จากระยะทางที่ไกลมาก
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถนำพาพลังงาน (energy) และโมเมนตัม (momentum) ได้พร้อมกันได้
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีช่วงของความยาวคลื่นที่กว้างมากและครอบคลุมความถี่ที่หลากหลาย

# คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves)



# เจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ (James Clerk Maxwell)

- มีชีวิตอยู่ระหว่างปี ค.ศ. 1831 – 1879
- เป็นนักฟิสิกส์ทฤษฎีชาวสกอตแลนด์
- พัฒนาทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแสง
- ประสบความสำเร็จในการอธิบายเรื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้อย่างลึกซึ้งนำมาสู่การสร้างหนึ่งในสมการที่โด่งดังที่สุดในโลกซึ่งได้รับการตั้งชื่อตามชื่อของเขา
- นอกจากนั้นยังพัฒนาและอธิบายเรื่องต่างๆ เช่น
  - ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส (Kinetic theory of gases)
  - ธรรมชาติของวงแหวนของดาวเสาร์ (Nature of Saturn's rings)
  - การมองเห็นสี (Color vision)



# สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

- ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์สร้างขึ้นจากการรวมกันของกฎและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- เขาพิสูจน์ให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือผลลัพธ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่งซึ่งสามารถแสดงการมีอยู่ได้ด้วยสมการทั้ง 4 ดังต่อไปนี้

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

กฎของเกาส์สำหรับปริมาณทางไฟฟ้า  
(Gauss's Law of Electricity)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

กฎของแม่เหล็ก  
(Law of Magnetism)

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

กฎของฟาราเดย์  
(Faraday's law)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

กฎของแอมแปร์  
(Ampere's Law)

# สมการของแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations)

- ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์สร้างขึ้นจากการรวมกันของกฎและทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
- เขาพิสูจน์ให้เห็นว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือผลลัพธ์ทางธรรมชาติอย่างหนึ่งซึ่งสามารถแสดงการมีอยู่ได้ด้วยสมการทั้ง 4 ดังต่อไปนี้

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

กฎของเกาส์สำหรับปริมาณทางไฟฟ้า  
(Gauss's Law of Electricity)

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

กฎของแม่เหล็ก  
(Law of Magnetism)

$$(\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

กฎของฟาราเดย์  
(Faraday's law)

$$(\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \mu_0 \vec{j}$$

กฎของแอมแปร์  
(Ampere's Law)

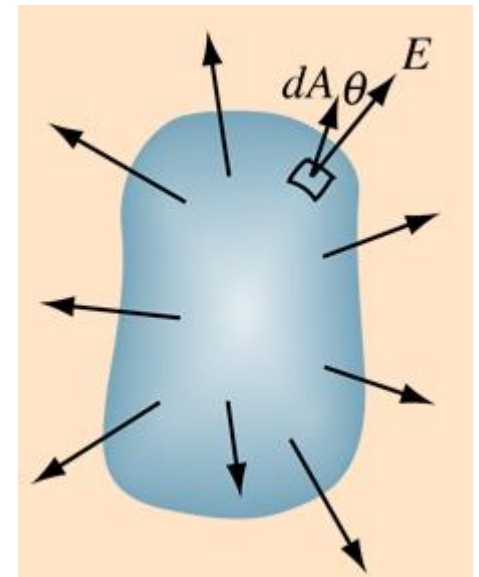
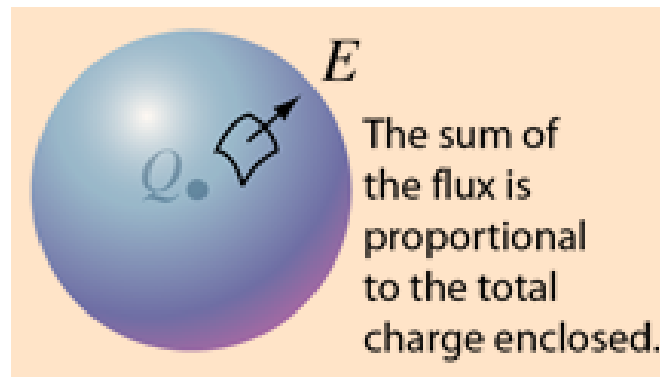
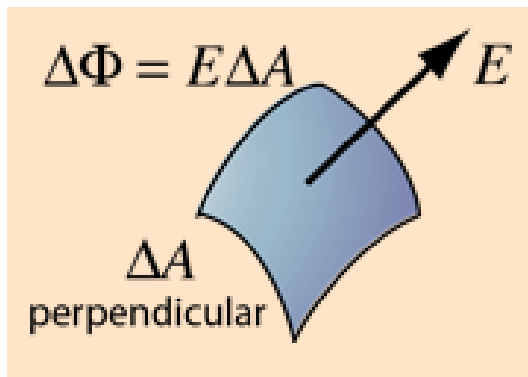
# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎของเกาส์

## (Maxwell's Equation 1 – Gauss' Law)

ฟลักซ์ไฟฟ้าทั้งหมด (total electric flux) ที่เคลื่อนที่ออกมาจากผิวปิด (closed surface) ใดๆ จะมีค่าเท่ากับประจุ (charge) ทั้งหมดที่อยู่ภายในพื้นที่ผิวปิดนั้นหารด้วย  $\epsilon_0$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

สิ่งนี้มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้ารวมถึงการกระจายตัวของประจุซึ่งเป็นต้นกำเนิด



# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎของเกาส์

## (Maxwell's Equation 1 – Gauss' Law)

ฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux;  $\phi_E$ )

$$\phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad \text{---- (1)}$$

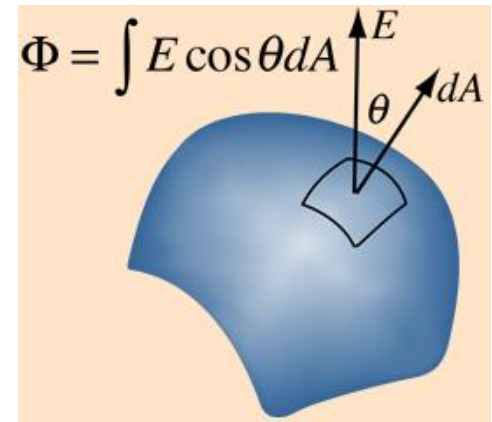
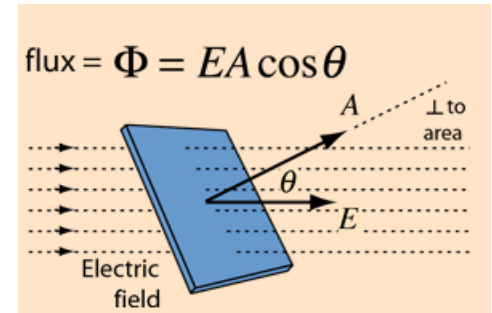
ในกรณีของผิวปิดแบบเกาส์เซียน (closed Gaussian surface)

$$\phi_E = \oiint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \text{---- (2)}$$

เนื่องจาก (1) = (2) ดังนั้น

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \text{---- (3)}$$

Integral form of Maxwell's 1<sup>st</sup> equation





# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎของเกาส์

## (Maxwell's Equation 1 – Gauss' Law)

จำนวนของประจุทั้งหมด (total charge) ในเทอมของความหนาแน่นประจุ-ปริมาตร (volume charge density) คือ

$$q = \int p dv \quad \text{---- (4)}$$

ดังนั้นสมการ (3) จึงกลายเป็น

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{1}{\epsilon_0} \int p dv$$

แก้เทอมฝั่งซ้ายของสมการด้านบนโดยใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (divergence theorem)

$$\int (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int p dv$$

# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎของเกาส์

## (Maxwell's Equation 1 – Gauss' Law)

$$\int (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV = \frac{1}{\epsilon_0} \int p dv$$

$$\int (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) dV - \frac{1}{\epsilon_0} \int p dv = 0$$

$$\int \left[ (\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \frac{p}{\epsilon_0} \right] dv = 0$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \frac{p}{\epsilon_0} = 0$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) = \frac{p}{\epsilon_0}$$

Differential form of Maxwell's 1<sup>st</sup> equation

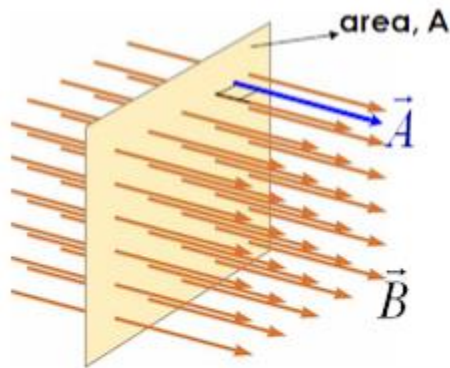
# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก

## (Maxwell's Equation 2 – Gauss' Law in Magnetism)

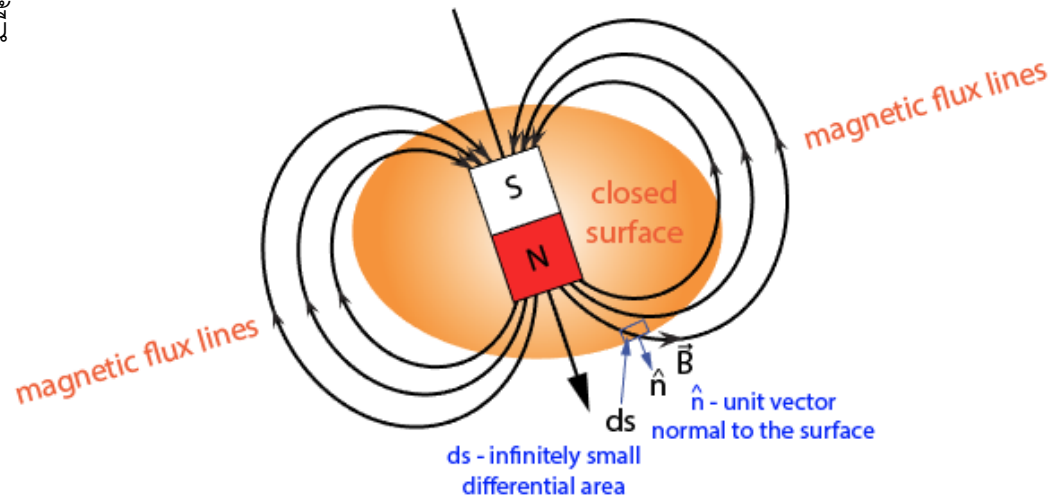
- ฟลักซ์แม่เหล็กสุทธิ (net magnetic flux) ที่เคลื่อนที่ออกมาจากผิวปิดใดๆ มีค่าเท่ากับศูนย์เสมอ

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

- จำนวนของเส้นสนามแม่เหล็ก (magnetic field lines) ที่เคลื่อนที่เข้าสู่ปริมาตรทรงปิดใดๆ ต้องมีค่าเท่ากับจำนวนของเส้นสนามแม่เหล็กที่เคลื่อนที่ออกมาจากปริมาตรทรงปิดดังกล่าวเสมอ
- เพราะหากไม่เป็นเช่นนั้นเราต้องพบแม่เหล็กขั้วเดียว (magnetic monopoles) ในธรรมชาติ
  - ซึ่งไม่เคยถูกค้นพบเลยจนถึงทุกวันนี้



$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \theta$$



# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎของเกาส์สำหรับแม่เหล็ก

## (Maxwell's Equation 2 – Gauss' Law in Magnetism)

จากกฎของเกาส์ในแบบ integral

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

แก้เทอมฝั่งซ้ายของสมการด้านบนโดยใช้ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์ (divergence theorem)

$$\int (\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) dV = 0$$

จึงสรุปได้ว่า

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

Differential form of Maxwell's 2<sup>st</sup> equation

# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

## (Maxwell's Equation 3 – Faraday's Law of Induction)

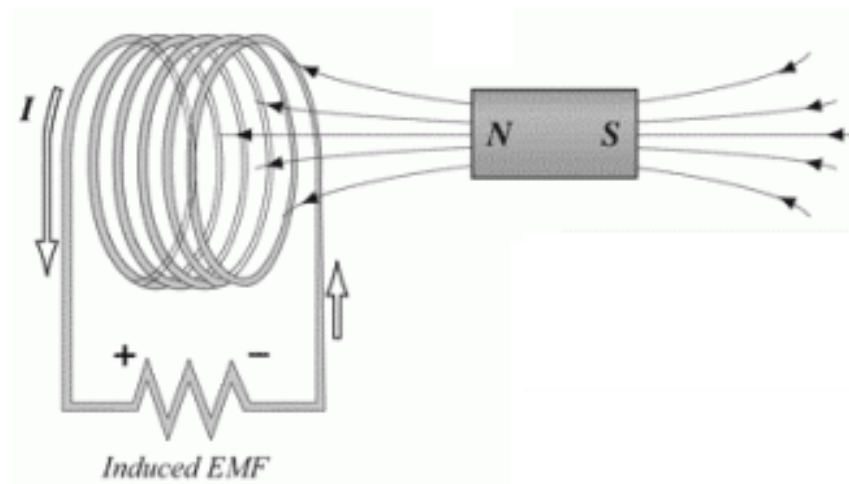
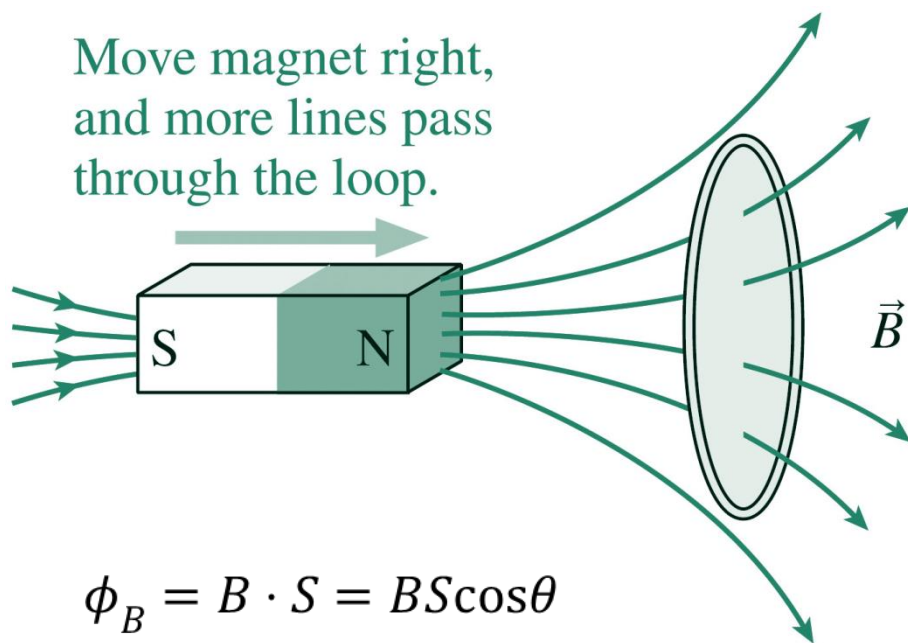
- ใช้อธิบายการสร้างสนามไฟฟ้าโดยสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา (time-varying magnetic field)
- แรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force; emf) ซึ่งเป็นปริพันธ์เชิงเส้น (line integral) ของสนามไฟฟ้ารอบเส้นทางปิดใดๆ (closed path) จะมีค่าเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์แม่เหล็กที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวปิดที่ถูกหุ้มด้วยเส้นทางดังกล่าว

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- ผลลัพธ์อย่างหนึ่งที่เกิดขึ้นคือเกิดกระแสที่ถูกเหนี่ยวนำขึ้นภายในวงปิดเหนี่ยวนำ (conducting loop) ซึ่งวางตัวอยู่สนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลา

# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ (Maxwell's Equation 3 – Faraday's Law of Induction)

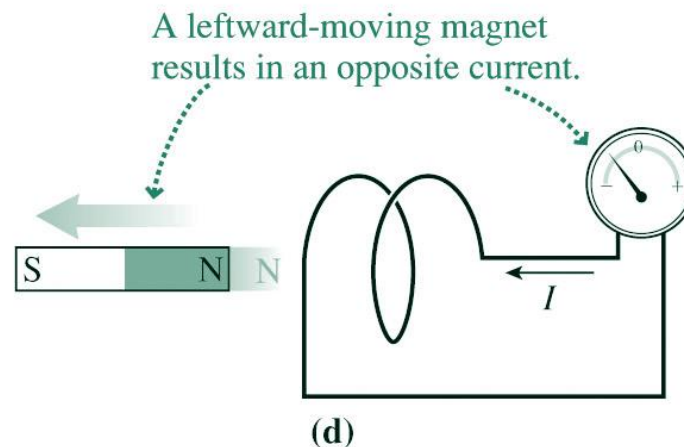
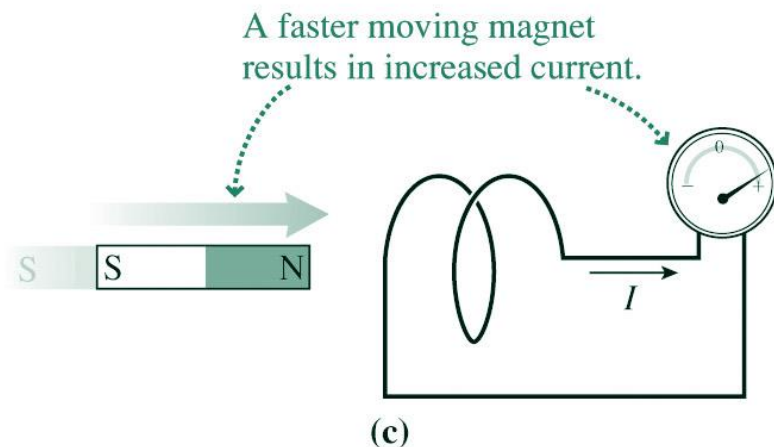
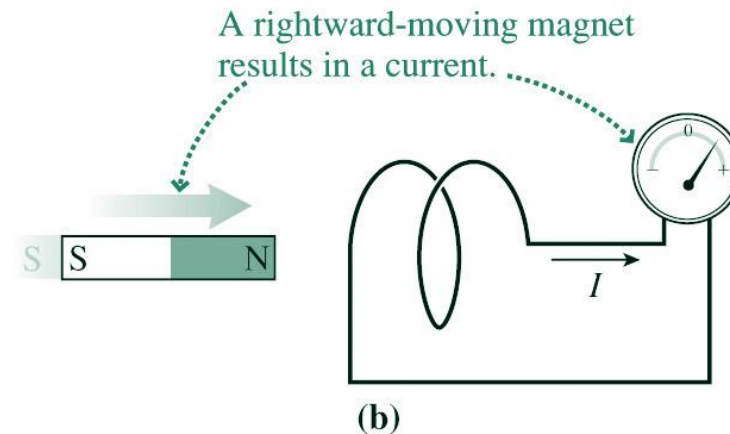
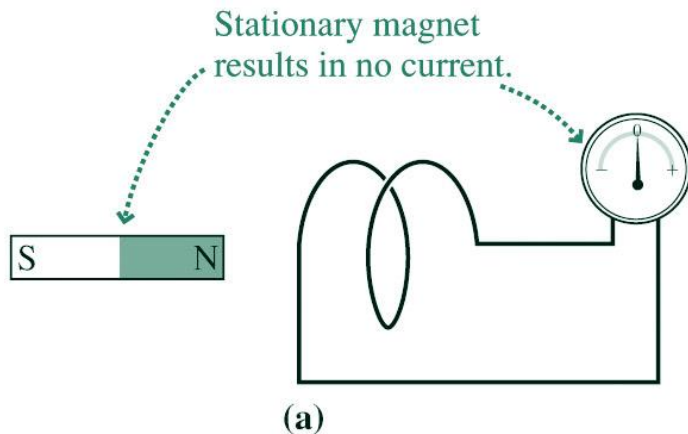
แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (**induced electromotive force; emf;  $\mathcal{E}$** )



$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \phi_B}{\Delta t}$$

# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

## (Maxwell's Equation 3 – Faraday's Law of Induction)



# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

## (Maxwell's Equation 3 – Faraday's Law of Induction)

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi_B}{dt}$$

เนื่องจาก emf มีความสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้าดังสมการ

$$\varepsilon = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

และเนื่องจาก  $\phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$

นำ 2 สมการด้านล่างใส่ลงในสมการด้านบนสุดจึงได้ว่า

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = -N \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

เมื่อ  $N = 1$ ;

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

Integral form of Maxwell's 3<sup>rd</sup> equation



# สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์

## (Maxwell's Equation 3 – Faraday's Law of Induction)

$$\int \vec{E} \cdot d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

แก้เทอมฝั่งซ้ายของสมการด้านบนโดยใช้ทฤษฎีสโตคส์ (stokes theorem)

$$\int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\int (\vec{\nabla} \times \vec{E}) d\vec{A} + \frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$(\vec{\nabla} \times \vec{E}) + \frac{d\vec{B}}{dt} = 0$$

$$(\vec{\nabla} \times \vec{E}) = -\frac{d\vec{B}}{dt}$$

Differential form of Maxwell's 3<sup>th</sup> equation

## สมการของแมกซ์เวลล์ – กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equation 4 – Ampère-Maxwell Law)

ใช้อธิบายการสร้างสนามแม่เหล็กโดยสนามไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปและโดยกระแสไฟฟ้า

ปริพันธ์เชิงเส้น (line integral) ของสนามแม่เหล็กรอบเส้นทางปิดใดๆ มีค่าเท่ากับผลรวมของ  $\mu_0$  คูณกับกระแสสุทธิที่เคลื่อนที่ผ่านเส้นทางดังกล่าว และ  $\epsilon_0 \mu_0$  คูณกับอัตราการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวปิดที่ถูกหุ้มด้วยเส้นทางดังกล่าว

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

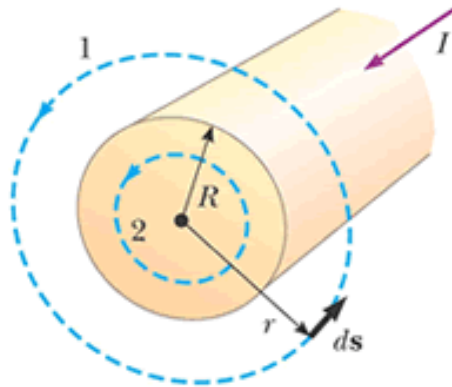
# การปรับเปลี่ยนกฎของแอมแปร์ (Modifications to Ampère's Law)

กฎของแอมแปร์ (Ampère's Law) ใช้สำหรับวิเคราะห์สนามแม่เหล็ก (magnetic fields) ที่ถูกสร้างขึ้นโดยกระแส (currents)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B} \oint d\vec{S} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} 2\pi r = \mu_0 I$$

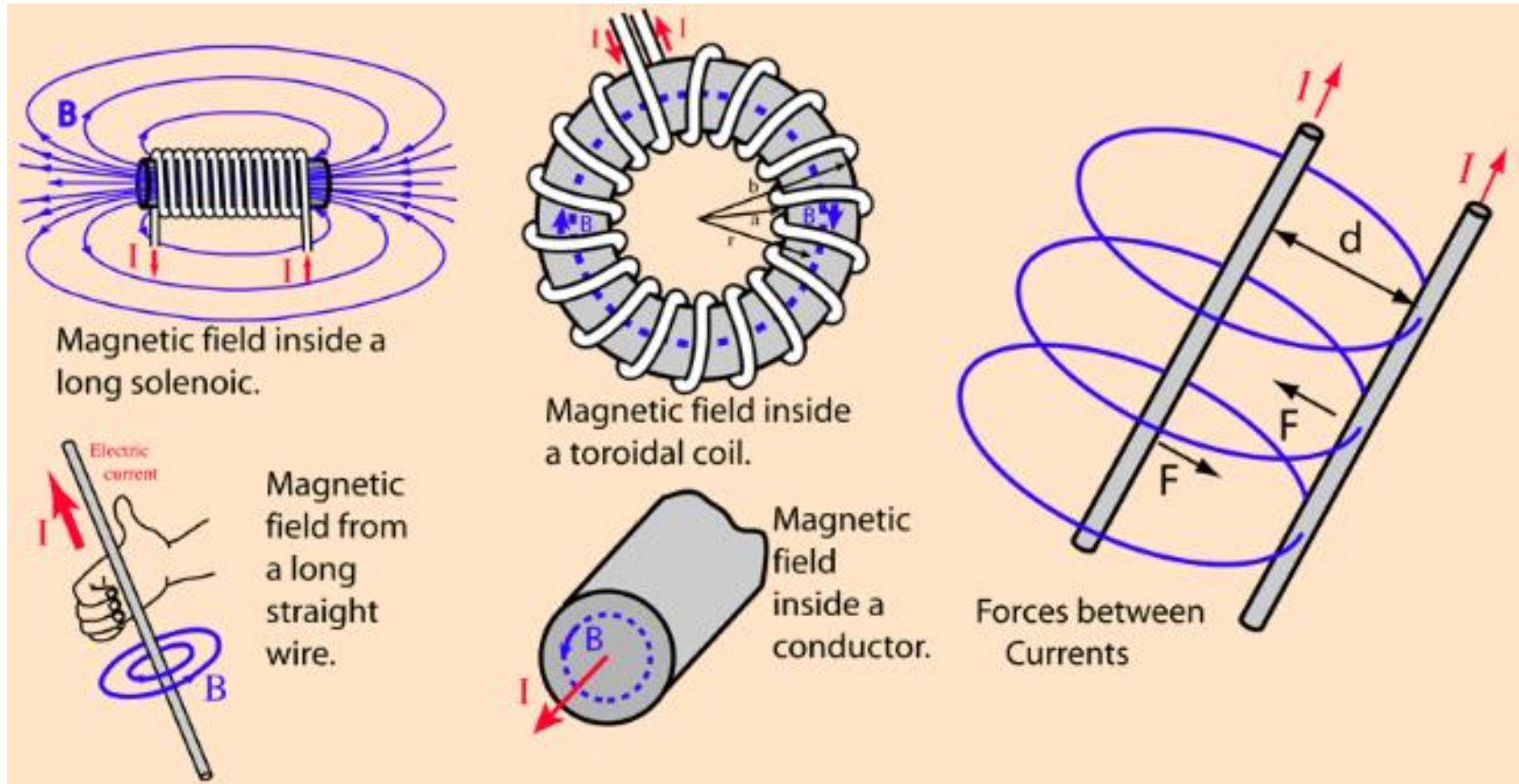
แต่รูปแบบดังกล่าวจะถูกต้องเมื่อสนามไฟฟ้า (electric fields) ที่ถูกสร้างขึ้นนั้นต้องไม่ขึ้นกับเวลา (constant in time)

แมกซ์เวลล์ได้ปรับเปลี่ยนสมการดังกล่าวให้ใช้ได้กับสนามไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลา (time-varying)

เขาได้ใส่เทอมของตัวแปรบางอย่างเพิ่มเข้าไป

# การปรับเปลี่ยนกฎของแอมแปร์ (Modifications to Ampère's Law)

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้กฎของแอมแปร์ (Ampère's Law Applications)



## การปรับเปลี่ยนกฎของแอมแปร์ (Modifications to Ampère's Law)

เทอมที่ถูกใส่เพิ่มเข้าไปนั้นมีตัวแปรที่ถูกเรียกว่า “กระแสกระจัด” หรือ **displacement current**,  $I_d$

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

เทอมนี้แสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กสามารถถูกสร้างขึ้นได้โดยทั้งจากกระแสเหนี่ยวนำ (conduction currents) และสนามไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลา (time-varying electric fields)

รูปแบบทั่วไปของกฎของแอมแปร์จึงกลายเป็น

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

บางครั้งถูกเรียกว่ากฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์

# การปรับเปลี่ยนกฎของแอมแปร์ (Modifications to Ampère's Law)

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 I$$

Integral form of Maxwell's 4<sup>th</sup> equation

ความหนาแน่นกระแส (current density;  $j$ ) นิยามจาก

$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

สมการด้านบนจึงกลายเป็น

$$\int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

แก้เทอมฝั่งซ้ายของสมการด้านบนโดยใช้ทฤษฎีสโตคส์ (stokes theorem)

$$\int (\vec{\nabla} \times \vec{B}) d\vec{A} = \mu_0 \int \vec{j} \cdot d\vec{A}$$

$$\int [(\vec{\nabla} \times \vec{B}) - \mu_0 \vec{j}] \cdot d\vec{A} = 0$$

$$(\vec{\nabla} \times \vec{B}) = \mu_0 \vec{j}$$

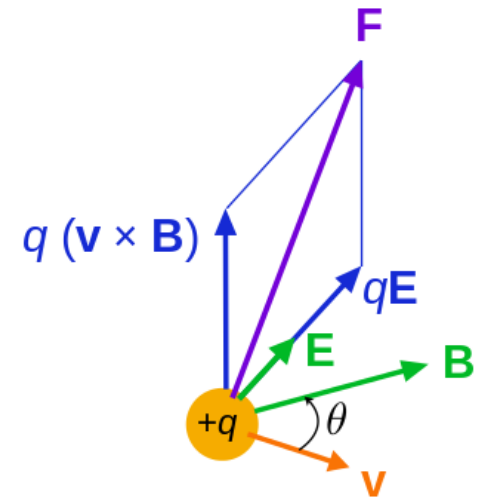
Differential form of Maxwell's 4<sup>th</sup> equation

# กฎของแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force Law)

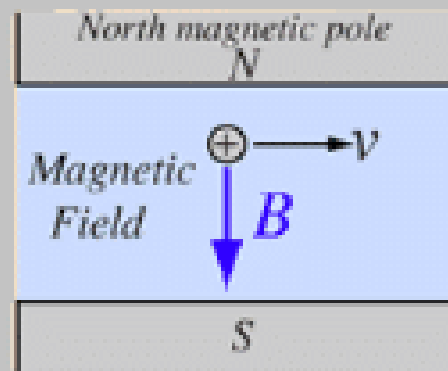
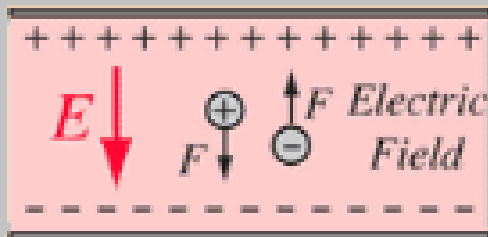
เมื่อมีสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเกิดขึ้น ณ จุดเดียวกันในปริภูมิใดๆ จะเกิดแรงกระทำที่มีชื่อว่า “แรงลอเรนซ์” ต่ออนุภาคประจุ  $q$  นั้นๆ เสมอ ซึ่งสามารถคำนวณได้จาก

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

สมการของแมกซ์เวลล์ที่ผสมรวมกับกฎของแรงลอเรนซ์นี้จะสามารถอธิบายอันตรกิริยาทางแม่เหล็กไฟฟ้าแบบดั้งเดิมได้อย่างสมบูรณ์



Electric force  
 $qE$



"Magnetic force of magnitude  $qvB\sin\theta$  perpendicular to both  $v$  and  $B$ "

# สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Properties of EM Waves)

- ผลเฉลยของสมการลำดับที่ 3 และ 4 ของสมการแมกซ์เวลล์แสดงถึงสมบัติความเป็นคลื่นโดยทั้งสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $B$  มีความสอดคล้องกับสมการคลื่น
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแสงเสมอ

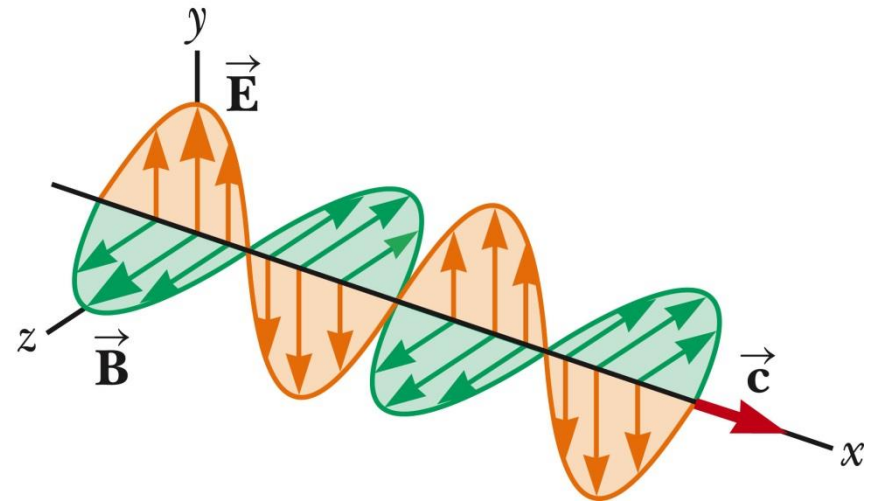
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

- สมการนี้ได้มาจากผลเฉลยของสมการของแมกซ์เวลล์



# สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Properties of EM Waves)

- องค์ประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะตั้งฉากซึ่งกันและกันรวมทั้งยังตั้งฉากกับทิศทางของการเคลื่อนที่อีกด้วย
  - สิ่งที่เกิดขึ้นนี้จึงสรุปได้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง (transverse waves)
- รูปด้านขวาแสดงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดไซน์ที่กำลังเคลื่อนที่ตามทิศทางแกน  $x$  ด้วยอัตราเร็ว  $c$



# สมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Properties of EM Waves)

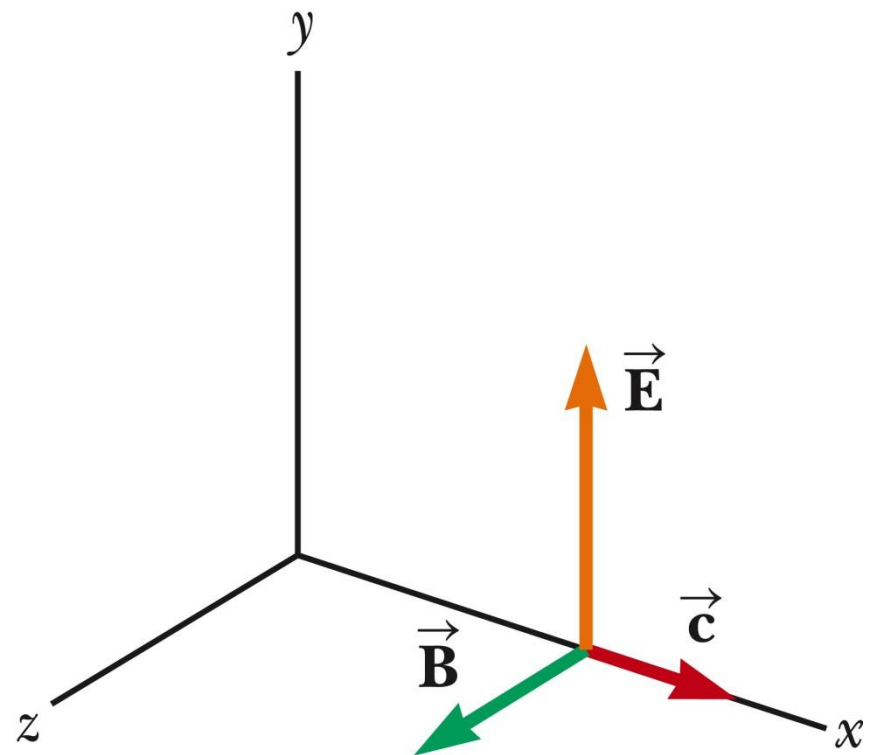
- ขนาด (magnitudes) ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในสุญญากาศมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$c = E/B$$

- สิ่งนี้คือผลเฉลยของอนุพันธ์ย่อย (partial differentials) ซึ่งได้มาจากสมการของแมกซ์เวลล์
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ายังพฤติกรรมตามหลักการซ้อนทับของคลื่น (superposition principle) อีกด้วย

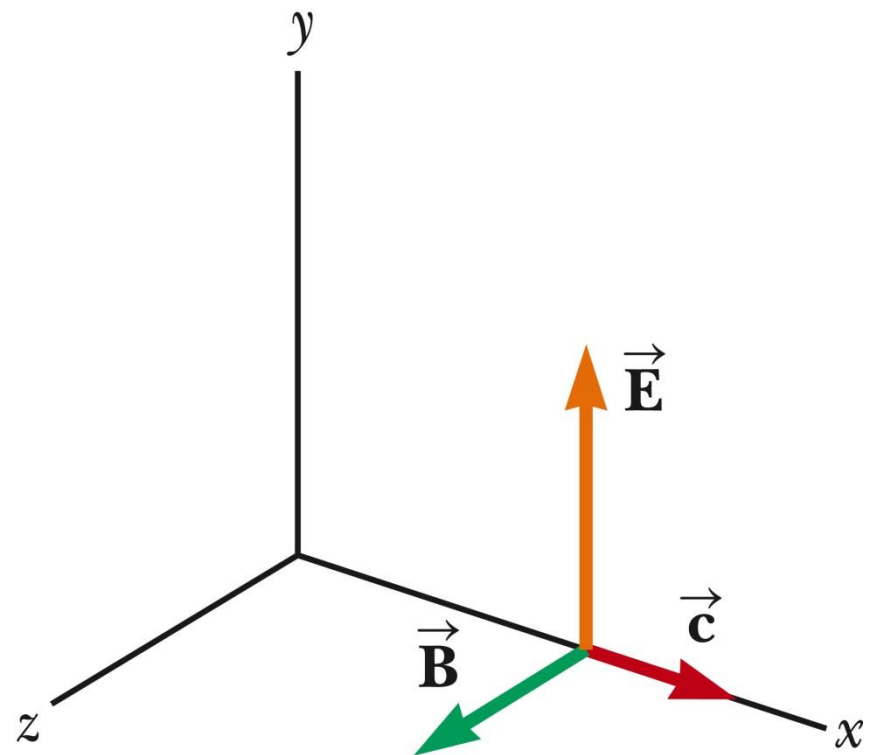
# คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบ (Plane Electromagnetic Waves)

- กำหนดให้เวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นตั้งฉากกันและมีพฤติกรรมทางปริภูมิ-เวลาสอดคล้องกับสมการของแมกซ์เวลล์
- กำหนดให้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งประกอบด้วยสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $B$  เคลื่อนที่ไปตามทิศทางแกน  $x$  ดังรูป
- สนามไฟฟ้า  $E$  นิยมกำหนดให้วางตัวอยู่ในทิศทางแกน  $y$  และสนามแม่เหล็ก  $B$  วางตัวอยู่ในทิศทางแกน  $z$



# คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าระนาบ (Plane Electromagnetic Waves)

- คลื่นใดๆ ก็ตามทีประกอบด้วยสนามไฟฟ้า  $E$  และสนามแม่เหล็ก  $B$  ที่มีทิศทางการสั่นที่แน่นอนเพียงแค่ว่าทิศทางเดียวจะถูกระบุเรียกว่า “คลื่นโพลาไรซ์เชิงเส้น” หรือ *linearly polarized waves*
- เรายังนิยามกำหนดให้ที่ตำแหน่งใดๆ ในปริภูมิ ความเข้มของสนามแม่เหล็ก  $B$  และสนามไฟฟ้า  $E$  นั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง  $x$  และเวลา  $t$  เท่านั้น



# พอยน์ติ่งเวคเตอร์ (Poynting Vector)

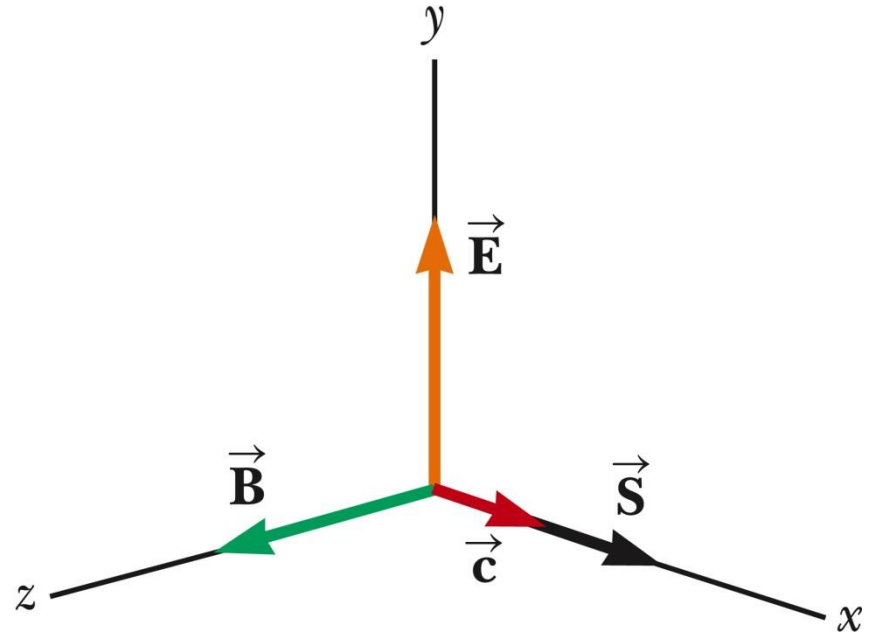
- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถนำพาพลังงาน (energy) ไปด้วยได้เสมอ
- เมื่อเคลื่อนที่ผ่านไปยังปริภูมิใดๆ จึงสามารถส่งผ่านพลังงานดังกล่าวไปสู่วัตถุที่ อยู่ในเส้นทางการเคลื่อนที่นั้น
- อัตราการส่งผ่านพลังงานโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกอธิบายด้วยเวคเตอร์ชนิดหนึ่งซึ่งเรียกว่าพอยน์ติ่งเวคเตอร์ **Poynting vector**;

# พอยน์ติงเวกเตอร์ (Poynting Vector)

- พอยน์ติงเวกเตอร์ (Poynting vector) นิยามขึ้นจาก

$$\vec{S} \equiv \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$

- มีทิศทางเดียวกันกับทิศทางของการแผ่รังสี
- เป็นสิ่งที่ขึ้นกับเวลา (time dependent)
  - ขนาด (magnitude) แปรเปลี่ยนไปตามเวลา
  - ขนาดจะเพิ่มถึงจุดสูงสุดเท่ากับขนาดของ  $E$  และ  $B$



# พอยน์ติ่งเวคเตอร์ (Poynting Vector)

- ขนาดของเวคเตอร์แสดงให้เห็นถึงอัตราการส่งผ่านพลังงานต่อพื้นที่ผิว 1 หน่วยซึ่งตั้งฉากกับทิศทางการเดินทางของคลื่น
  - ดังนั้นขนาดจึงแสดงถึงกำลัง (*power*) ต่อหน่วยพื้นที่ (*unit area*)
- หน่วย SI ของพอยน์ติ่งเวคเตอร์คือ  $\text{J}/(\text{s}\cdot\text{m}^2) = \text{W}/\text{m}^2$ .

# ความเข้ม (Intensity)

- ความเข้มของคลื่น (wave intensity,  $I$ ) คือค่าเฉลี่ยต่อเวลาของพอยน์ติงเวกเตอร์  $S$  เมื่อเคลื่อนที่ครบ 1 รอบ (cycles) หรือมากกว่า
  - เป็นการนิยามความเข้มในแบบเดียวกันกับก่อนหน้านี้
  - วงการอุตสาหกรรมทางทัศนศาสตร์ (optics industry) นิยมเรียกค่ากำลังต่อหน่วยพื้นที่ว่า *irradiance*
    - Radiant intensity ถูกนิยามว่าเป็นกำลัง (power) ในหน่วยวัตต์ (watts) ต่อมุมตัน (solid angle)
- เมื่อค่าเฉลี่ยถูกนำออกไป ค่าเฉลี่ยต่อเวลาของ  $\cos^2(kx - \omega t) = 1/2$  จึงถูกรวมเข้าม้างสมการ

$$I = S_{\text{avg}} = \frac{E_{\text{max}} B_{\text{max}}}{2 \mu_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2 \mu_0 c} = \frac{c B_{\text{max}}^2}{2 \mu_0}$$



# ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density)

- ความหนาแน่นพลังงาน (energy density,  $u$ ) คือพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร
- สำหรับสนามไฟฟ้า,  $u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$
- สำหรับสนามแม่เหล็ก,  $u_B = \frac{1}{2} \mu_0 B^2$
- เนื่องจาก  $B = E/c$  และ  $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ 
$$u_B = u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$$
- ความหนาแน่นพลังงานขณะใดขณะหนึ่ง (instantaneous energy density) ของสนามแม่เหล็กของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีค่าเท่ากับความหนาแน่นพลังงานขณะใดขณะหนึ่งของสนามไฟฟ้าเสมอ
  - ในปริมาตรใดๆ พลังงานจะถูกแบ่งออกเท่าๆ กันสำหรับสนามทั้งสอง

# ความหนาแน่นพลังงาน (Energy Density)

- ความหนาแน่นพลังงานขณะใดขณะหนึ่ง (total instantaneous energy density) คือผลรวมของความหนาแน่นพลังงานที่มีความเกี่ยวข้องกับแต่ละสนาม

- $u = u_E + u_B = \epsilon_0 E^2 = B^2 / \mu_0$

- เนื่องจากสิ่งนี้คือค่าเฉลี่ยต่อหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งรอบ ดังนั้นค่าเฉลี่ยรวมจึงมีค่าเท่ากับ

- $u_{\text{avg}} = \epsilon_0 (E^2)_{\text{avg}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 = B_{\text{max}}^2 / 2\mu_0$

- ในเทอมของ  $I$ ,  $I = S_{\text{avg}} = cu_{\text{avg}}$

- ความเข้มของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีค่าเท่ากับค่าความหนาแน่นพลังงานเฉลี่ยคูณกับอัตราเร็วของแสง

# โมเมนตัม (Momentum)

- คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า นำพาโมเมนตัม (momentum) ได้เหมือนกับพลังงาน (energy)
- เมื่อโมเมนตัมถูกดูดกลืนบริเวณพื้นผิวใดๆ จะเกิดความดัน (pressure) กระทำบนพื้นผิวดังกล่าว
- กำหนดให้คลื่นนำพาพลังงานรวม  $T_{ER}$  มายังพื้นผิวในช่วงเวลา  $\Delta t$  โมเมนตัมรวมจะมีค่าเท่ากับ  $p = T_{ER} / c$  สำหรับการดูดกลืนสมบูรณ์

# ความดันและโมเมนตัม (Pressure and Momentum)

- ความดัน  $P$  นิยามขึ้นมาจากแรง (force) ต่อพื้นที่ 1 หน่วย (unit area)

$$P = \frac{F}{A} = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{c} \frac{(dT_{ER}/dt)}{A}$$

- แต่ขนาดของพอยน์ติงเวกเตอร์คือ  $(dT_{ER}/dt)/A$  และดังนั้น  $P = S / c$ .
  - สำหรับพื้นผิวที่ดูดกลืนอย่างสมบูรณ์แบบ
- สำหรับพื้นผิวที่สะท้อนอย่างสมบูรณ์นั้น  $p = 2T_{ER}/c$  และ  $P = 2S/c$
- ในกรณีของพื้นผิวที่มีค่าการสะท้อนอยู่ระหว่างตัวสะท้อนสมบูรณ์ (perfect reflector) และตัวดูดกลืนสมบูรณ์ (perfect absorber) นั้นความดันที่ถูกส่งผ่านไปยังพื้นผิวจึงมีค่าอยู่ระหว่าง  $S/c$  และ  $2S/c$
- สำหรับแสงอาทิตย์โดยตรง (direct sunlight) ความดันของการแผ่รังสี (radiation pressure) มีค่าประมาณ  $5 \times 10^{-6}$  N/m<sup>2</sup>

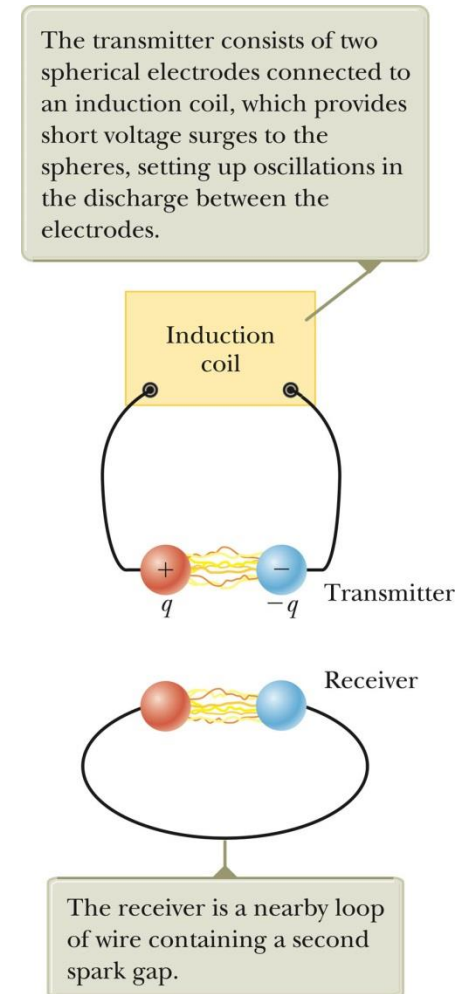
## ■ ไฮน์ริช รูดอล์ฟ เฮิร์ต (Heinrich Rudolf Hertz)

- มีชีวิตอยู่ระหว่างปี ค.ศ. 1857 – 1894
- เป็นนักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน
- เป็นคนแรกที่สามารถสร้างและตรวจพบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ
- การค้นพบครั้งสำคัญที่สุดนี้เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1887
- เขายังแสดงให้เห็นว่าแสงมีรูปแบบคลื่นที่แตกต่างกันอีกด้วย



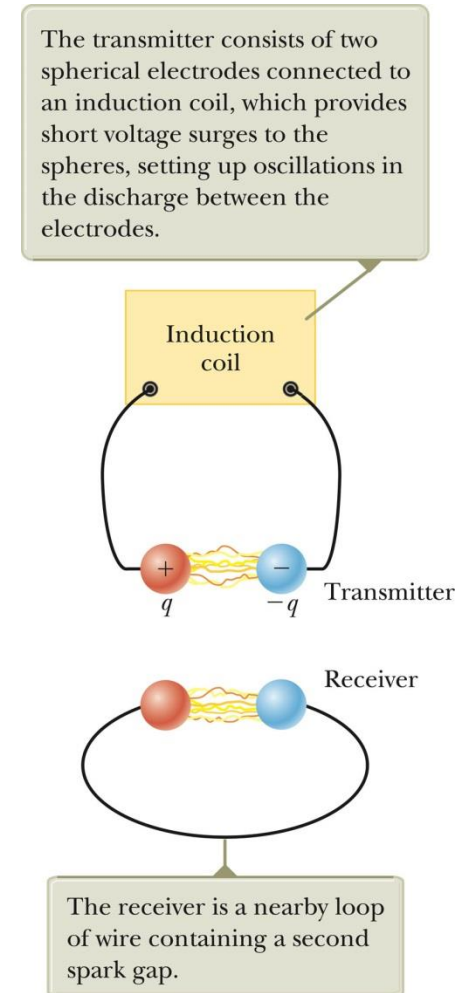
# การทดลองของเฮิร์ต (Hertz's Experiment)

- ขดลวดเหนี่ยวนำ (induction coil) เชื่อมต่ออยู่กับเครื่องส่งสัญญาณ (transmitter)
- เครื่องส่งสัญญาณประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าทรงกลม (spherical electrodes) 2 ชิ้นซึ่งวางห่างกันจนมีช่องว่างที่แคบมาก
- ขดลวดสร้างแรงดันไฟฟ้าขนาดสูงในระยะเวลาสั้นๆ ก่อนส่งต่อไปยังขั้วไฟฟ้าทั้งสอง
- เมื่ออากาศที่อยู่ระหว่างช่องว่างเกิดการไอออไนซ์ อากาศดังกล่าวจึงกลายเป็นตัวนำ (conductor) ที่ดีกว่า
- การคายประจุ (discharge) ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองแสดงพฤติกรรมการสั่นแบบออสซิลเลตที่ความถี่สูง
- วงจรที่แสดงไว้ด้านขวามีความสมมูลกับวงจร LC



# การทดลองของเฮิร์ต (Hertz's Experiment)

- ประกายไฟ (Sparks) ถูกเหนี่ยวนำให้เกิดขึ้นข้ามช่องว่างของขั้วไฟฟ้าตัวรับ (receiving electrodes) เมื่อความถี่ของเครื่องรับสัญญาณ (receiver) ถูกปรับให้ตรงกับความถี่ของเครื่องส่งสัญญาณ
- ในการทดลองที่เกี่ยวข้องต่อมา เฮิร์ตแสดงให้เห็นว่าการแผ่รังสีที่ถูกสร้างขึ้นด้วยอุปกรณ์ชนิดนี้แสดงสมบัติความเป็นคลื่นอีกด้วย
  - มีทั้งการแทรกสอด (interference) การเลี้ยวเบน (diffraction) การสะท้อน (reflection) การหักเห (refraction) และการเกิดโพลาไรเซชัน (polarization)
- เขายังตรวจวัดอัตราเร็วของการแผ่รังสีที่เกิดขึ้นนี้ได้ด้วยเช่นกัน
  - ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราเร็วของแสงที่ทราบกันดีในปัจจุบัน



# การสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเสาอากาศ

## (Production of EM Waves by an Antenna)

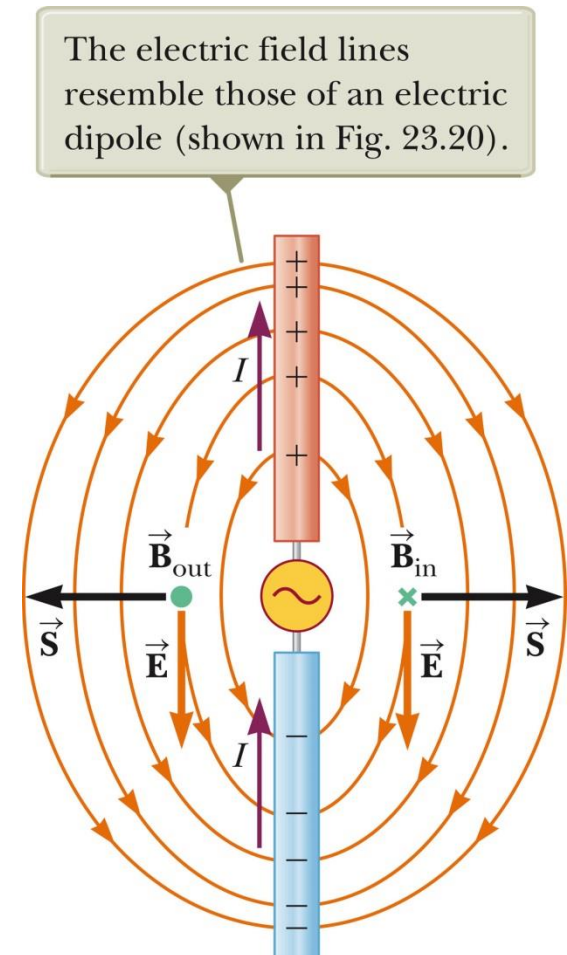
- ทั้งประจุสถิต (stationary charges) และกระแสตรง (steady currents) สามารถสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นได้
- กลไกพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับการแผ่รังสีนี้คือความเร่ง (acceleration) ของอนุภาคที่มีประจุ
- เมื่ออนุภาคที่มีประจุ (charged particle) มีความเร่ง (accelerates) จะทำให้เกิดการแผ่พลังงานออกมาเสมอ



# การสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเสาอากาศ

## (Production of EM Waves by an Antenna)

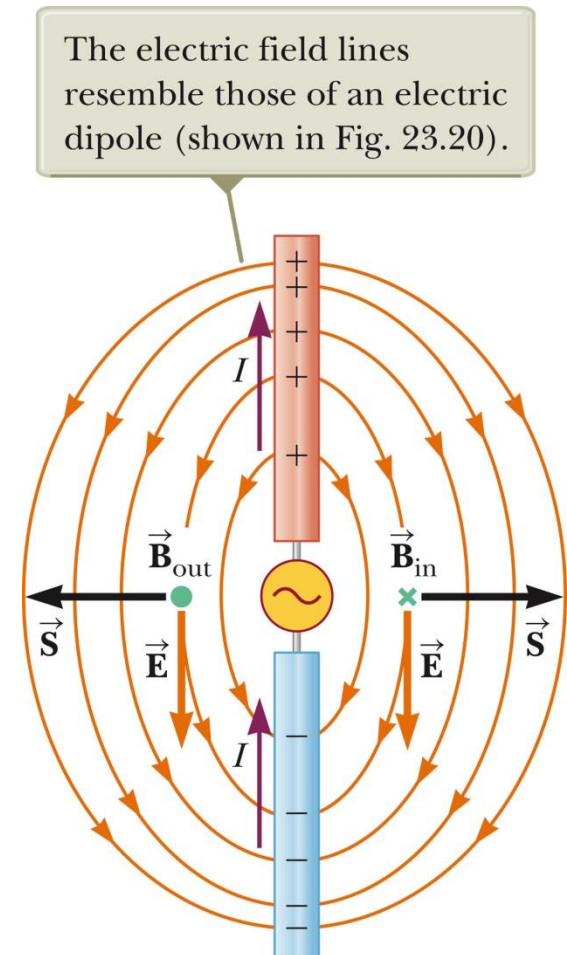
- รูปด้านขวาคือเสาอากาศแบบคลื่นครึ่งลูก (*half-wave antenna*)
- แท่งตัวนำ (conducting rods) สองแท่งถูกเชื่อมต่อกับแหล่งกำเนิดแรงดันสลับ (alternating voltage)
- ความยาวของแต่ละแท่งมีค่าเท่ากับ 1 ใน 4 ของความยาวคลื่นของการแผ่รังสีที่จะถูกส่งออกมา
- เครื่องกำเนิดสัญญาณ (oscillator) จะบังคับให้ประจุมีความเร่งระหว่างแท่งทั้งสอง
- เสาอากาศจึงถูกพิจารณาได้ว่าเป็น oscillating electric dipole
- เส้นสนามแม่เหล็กสร้างวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางล้อมรอบเสาอากาศและตั้งฉากกับเส้นสนามไฟฟ้าทุกจุด



# การสร้างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าโดยเสาอากาศ

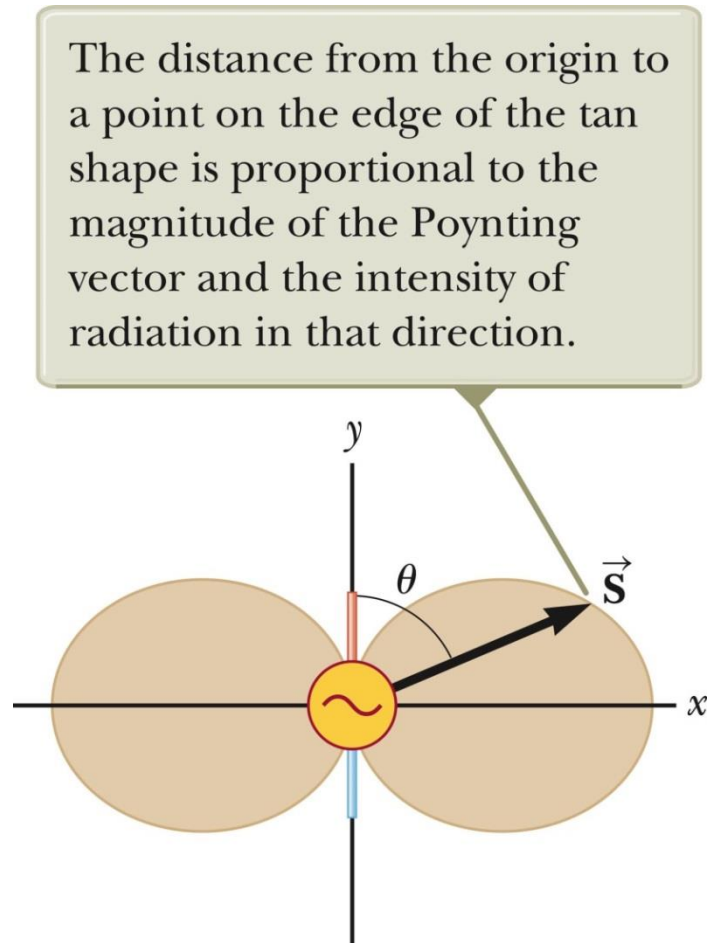
## (Production of EM Waves by an Antenna)

- สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีเฟสต่างกัน  $90^\circ$  ตลอดเวลา
- พลังงานไดโพล (dipole energy) จะหายไปอย่างรวดเร็วเมื่อเคลื่อนที่ออกจากเสาอากาศ
- การแผ่รังสีที่ถูกพบไกลออกไปจากเสาอากาศคือการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้าด้วยสนามแม่เหล็กที่ขึ้นกับเวลาและการเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กด้วยสนามไฟฟ้าที่ขึ้นกับเวลาอย่างต่อเนื่อง
- สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นด้วยกระบวนการนี้จะมีเฟสตรงกันและเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ  $1/r$
- ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นคือเกิดการไหลของพลังงานออกมาตลอดเวลา



## อาณาบริเวณเชิงมุมของความเข้ม (Angular Dependence of Intensity)

- รูปด้านขวาแสดงอาณาบริเวณเชิงมุมของความเข้มที่ถูกสร้างขึ้นโดยเสาอากาศไดโพล
- ความเข้ม (intensity) และกำลัง (power) ที่แผ่รังสีออกมาจะมีค่าสูงสุดในระนาบที่ตั้งฉากกับเสาอากาศและลากผ่านจุดกึ่งกลาง
- ความเข้มมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสมการ  $(\sin^2 \theta) / r^2$

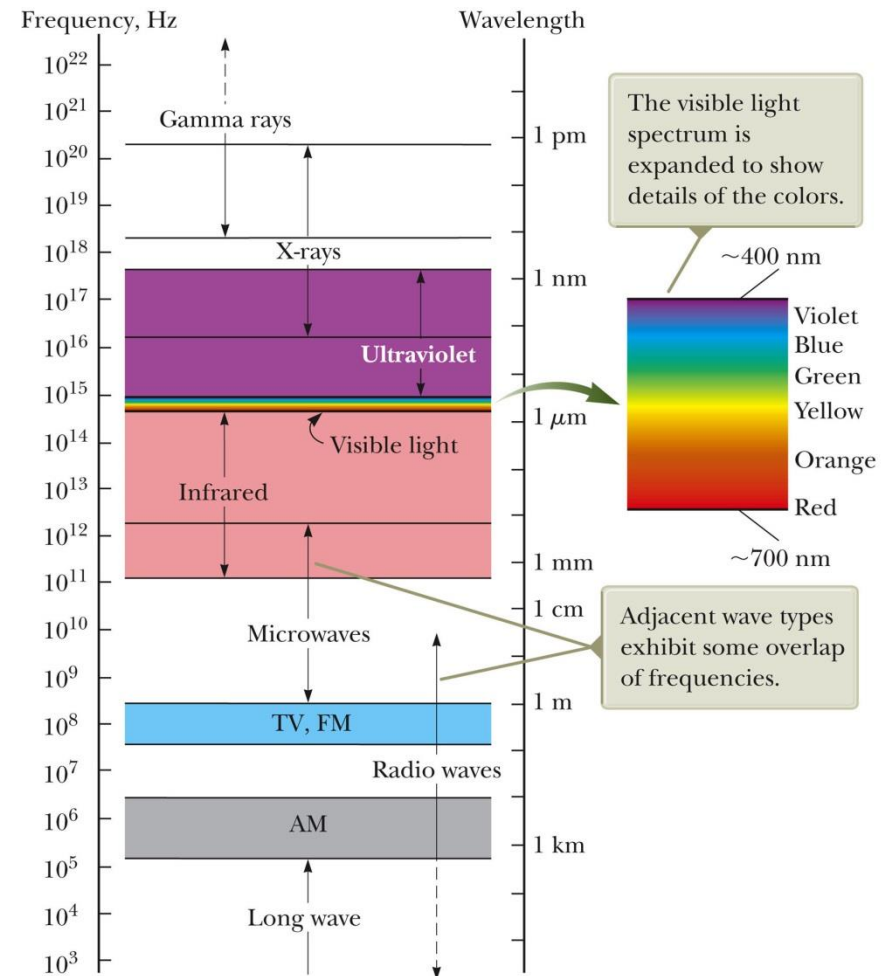


# สเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (The Spectrum of EM Waves)

- สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (EM spectrum) เกิดจากสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหลากหลายชนิดมารวมกัน
- แต่ไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจนว่าตำแหน่งใดเป็นจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแต่ละชนิด
- รูปแบบทั้งหมดของการแผ่รังสีแต่ละชนิดที่แตกต่างกันถูกสร้างขึ้นโดยปรากฏการณ์เดียวกันคือ ประจุที่มีความเร่ง (accelerating charges)

# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

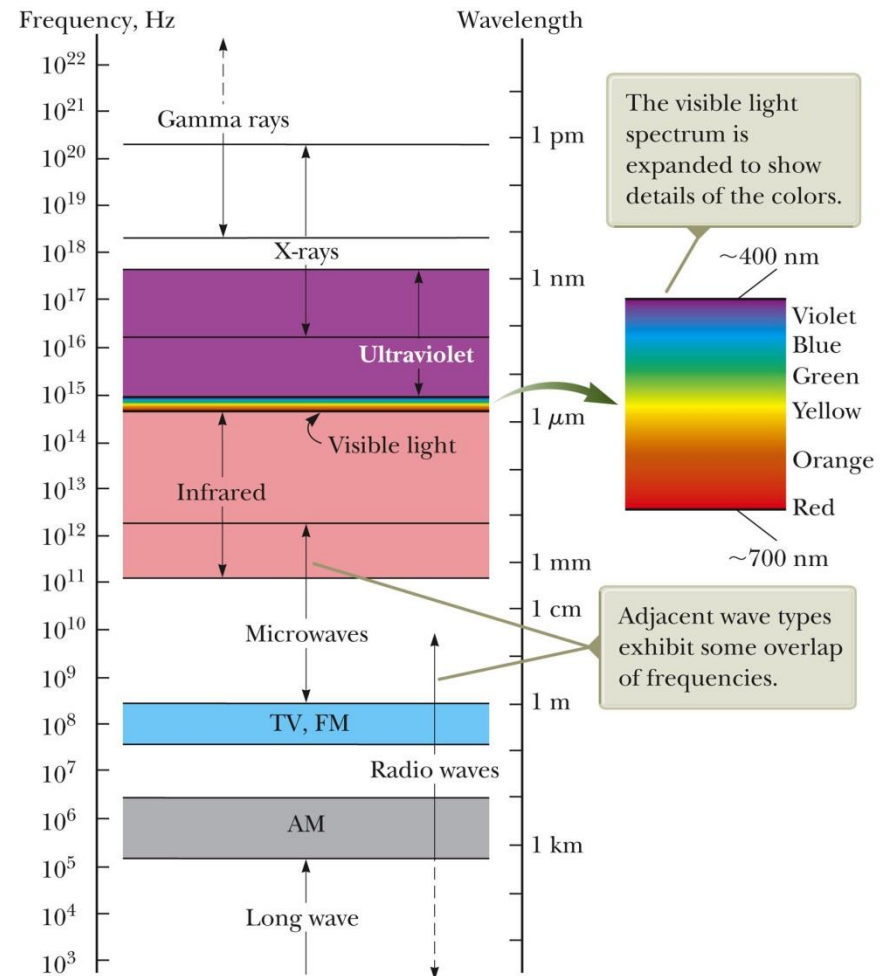
- สังเกตการทับซ้อน (overlap) ระหว่างคลื่นแต่ละชนิด
- แสงย่านตามองเห็น (Visible light) มีสัดส่วนน้อยมากในแถบสเปกตรัม
- ชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกจำแนกด้วยความถี่ (frequency) หรือความยาวคลื่น (wavelength)



# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## คลื่นวิทยุ (Radio Waves)

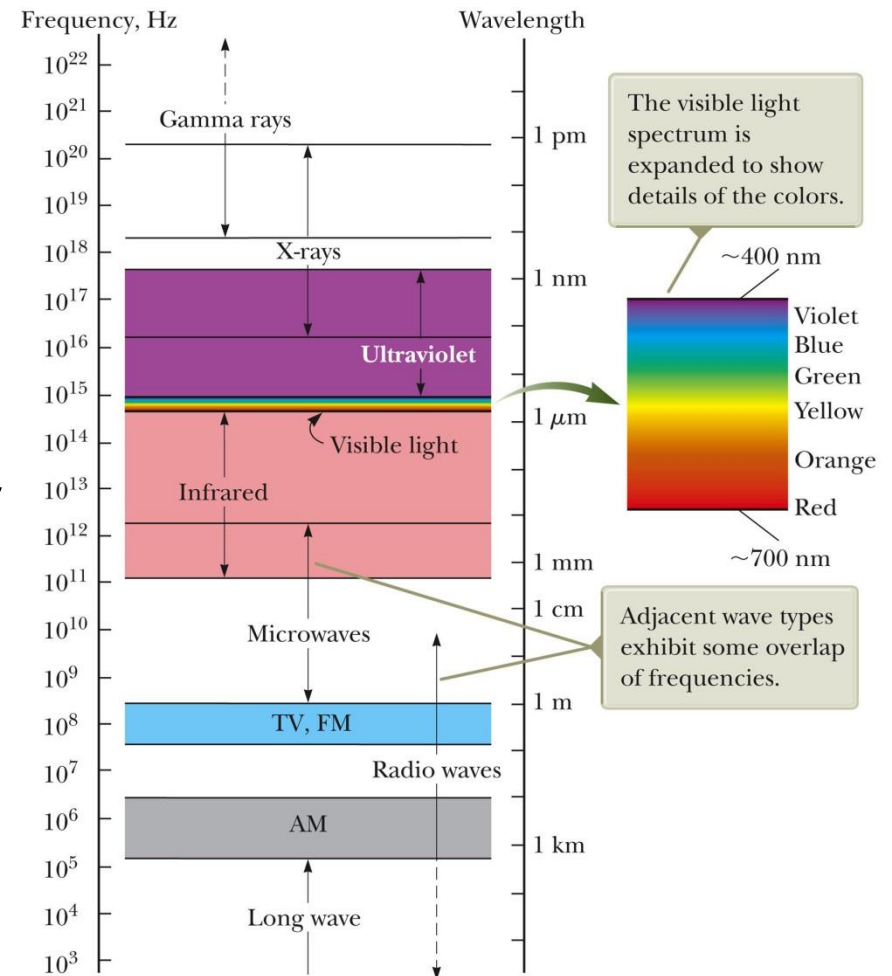
- มีความยาวคลื่นมากกว่า  $10^4$  m จนถึงประมาณ 0.1 m
- ใช้ในระบบการสื่อสารของวิทยุ (radio) และโทรทัศน์ (television)



# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## ไมโครเวฟ (Microwaves)

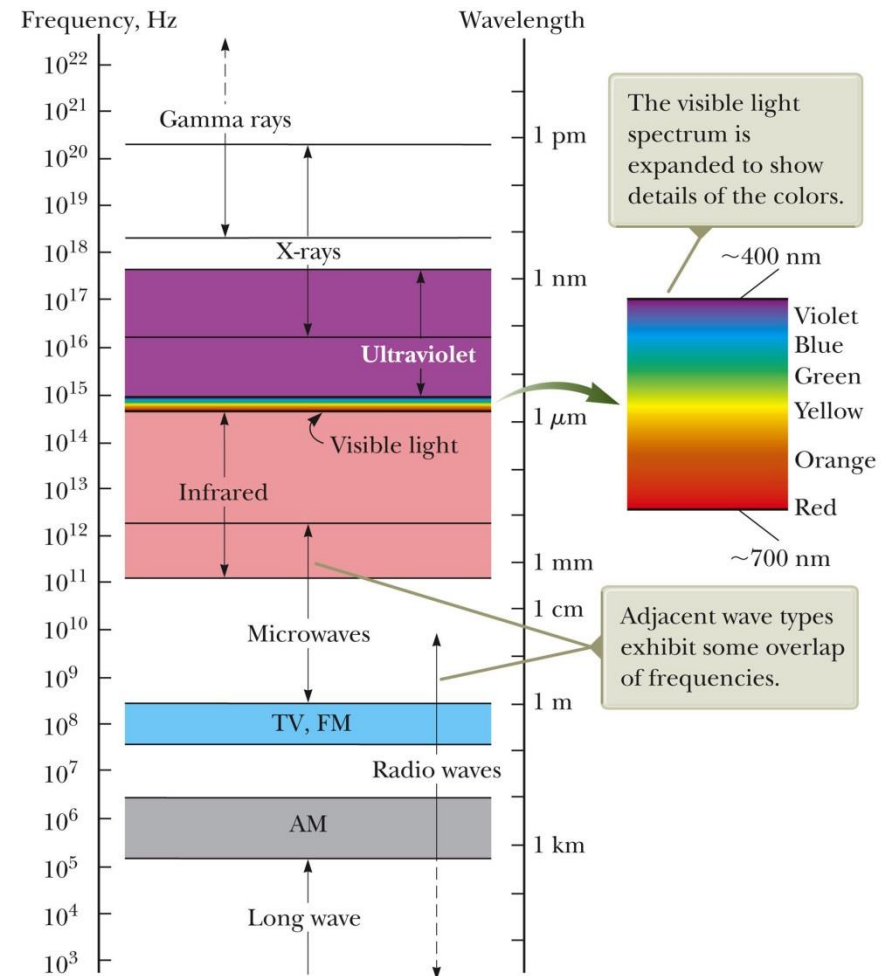
- มีความยาวคลื่นตั้งแต่ประมาณ 0.3 m ถึง  $10^{-4}$  m
- เหมาะสมเป็นอย่างมากสำหรับใช้งานในระบบเรดาร์ (radar systems)
- หนึ่งใน การนำไปประยุกต์ใช้งานที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือใช้ในเตาไมโครเวฟ (microwave ovens)



# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## คลื่นอินฟราเรด (Infrared waves)

- มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ  $10^{-3}$  m ถึง  $7 \times 10^{-7}$  m
- มักถูกเรียกผิดๆ ว่า “คลื่นความร้อน (heat waves)”
- ถูกสร้างขึ้นโดยวัตถุร้อน (hot objects) และโมเลกุล(molecules)
- มักถูกดูดกลืนอย่างรวดเร็วโดยวัตถุแทบทุกชนิด

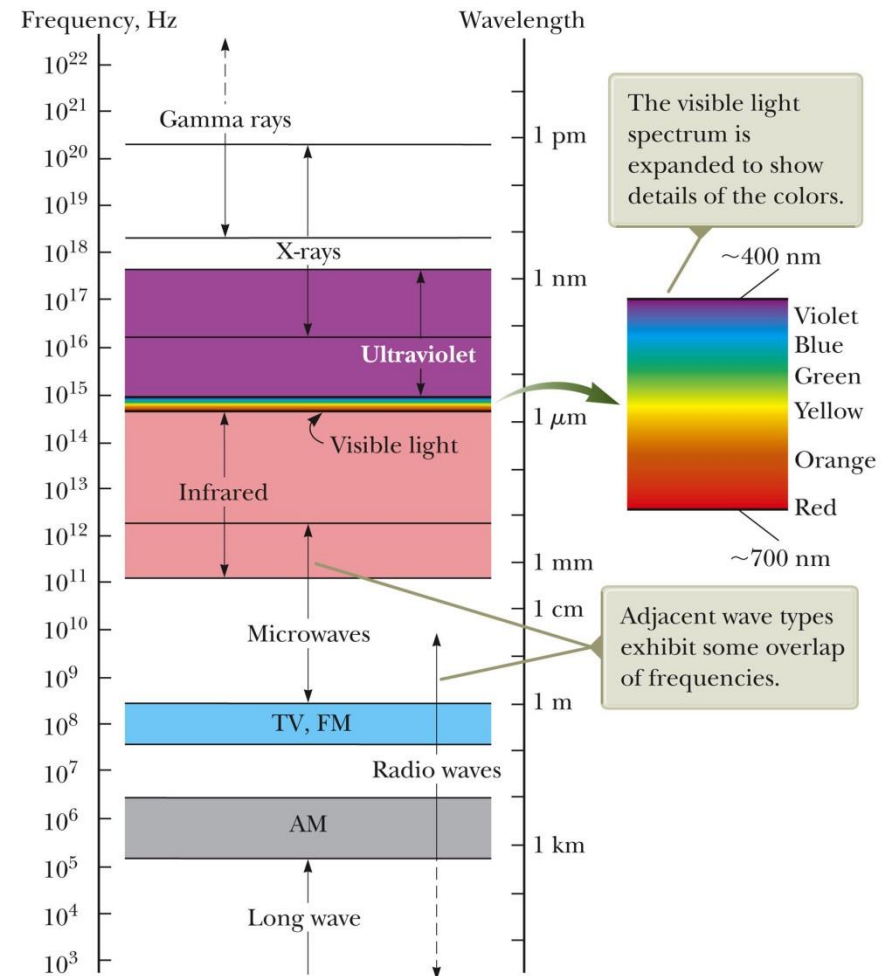




# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## แสงย่านตามองเห็น (Visible light)

- เป็นเพียงส่วนเล็กๆ ในแถบสเปกตรัมที่ถูกตรวจจับได้โดยตาของมนุษย์ (human eye)
- มีความไวต่อการถูกกระตุ้นมากที่สุดในช่วง  $5.5 \times 10^{-7} \text{ m}$  ซึ่งเป็นแสงเหลือง-เขียว (yellow-green)



# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## แสงย่านตามองเห็น (Visible light)

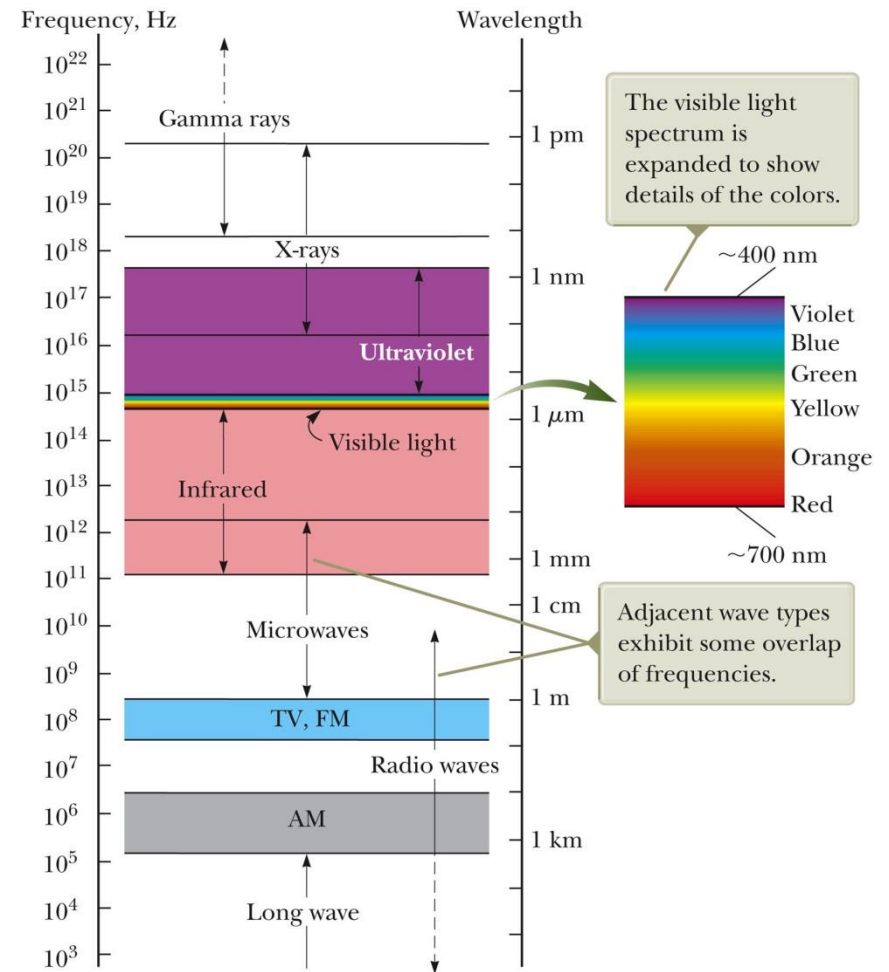
- ความยาวคลื่นที่แตกต่างกันส่งผลทำให้แสดงสีที่แตกต่างกัน
- มีช่วงสีตั้งแต่สีแดง (red) ( $\lambda \sim 7 \times 10^{-7} \text{ m}$ ) ไปจนถึงสีม่วง (violet) ( $\lambda \sim 4 \times 10^{-7} \text{ m}$ ).

**TABLE 34.1**

*Approximate Correspondence  
Between Wavelengths  
of Visible Light and Color*

Wavelength Range (nm)	Color Description
400–430	Violet
430–485	Blue
485–560	Green
560–590	Yellow
590–625	Orange
625–700	Red

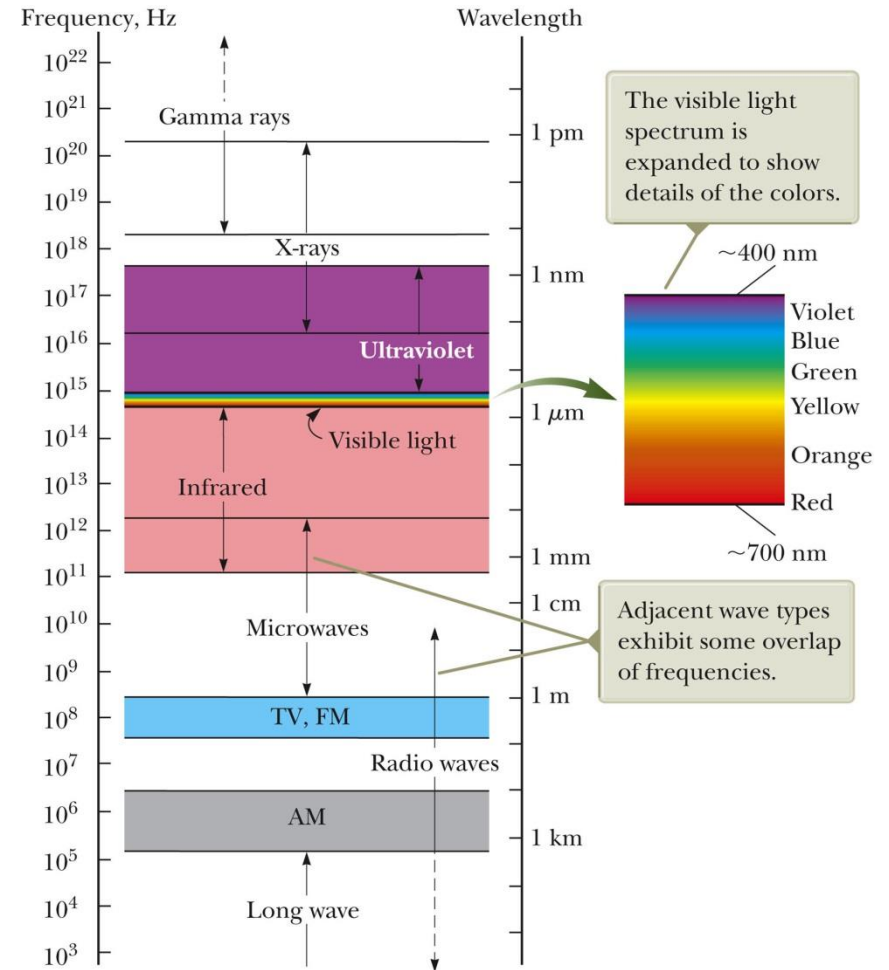
*Note:* The wavelength ranges here are approximate. Different people will describe colors differently.



# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## แสงอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet light)

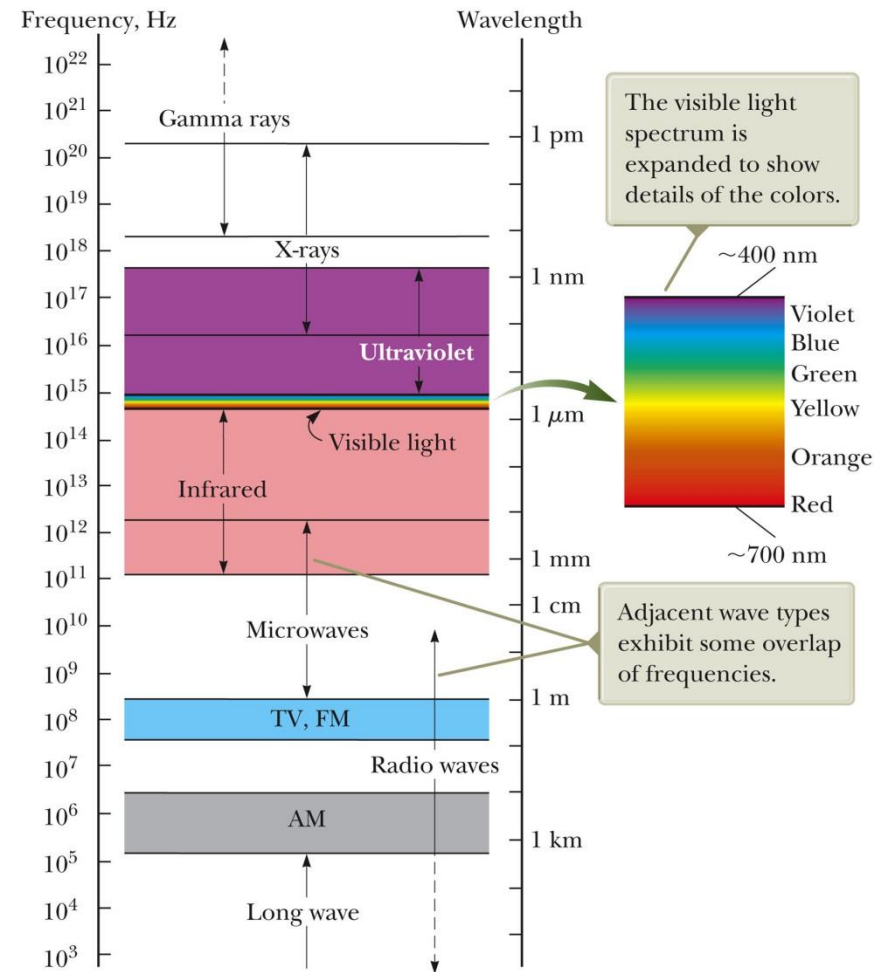
- มีความยาวคลื่นครอบคลุมตั้งแต่ประมาณ  $4 \times 10^{-7}$  m ถึง  $6 \times 10^{-10}$  m
- ดวงอาทิตย์ (sun) เป็นแหล่งกำเนิดแสง UV ที่สำคัญที่สุด
- แสง UV ส่วนใหญ่จากดวงอาทิตย์ถูกดูดกลืนในชั้นบรรยากาศสตราโตสเฟียร์ (stratosphere) โดยโอโซน (ozone) ที่อยู่ภายใน



# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## รังสีเอกซ์ (X-rays)

- มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ  $10^{-8}$  m ถึง  $10^{-12}$  m
- จุดกำเนิดโดยทั่วไปส่วนใหญ่ของรังสีเอกซ์คือการเร่งอิเล็กตรอนพลังงานสูง (high-energy electrons) ให้เข้าชนกับเป้าโลหะ (metal target)
- นิยมใช้ในเครื่องมือและอุปกรณ์วินิจฉัยโรคในทางการแพทย์



# สเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า (The EM Spectrum)

## รังสีแกมมา (Gamma rays)

- มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ  $10^{-10}$  m ถึง  $10^{-14}$  m
- ปลดปล่อยออกมาจากวัตถุกัมมันตรังสี (radioactive)
- มีอำนาจทะลุทะลวงสูงมากและสามารถทำให้เกิดความเสียหายอย่างรุนแรงกับเนื้อเยื่อหากดูดกลืนรังสีชนิดนี้เข้าไป

